

# **Teste de Caldeiras a Combustíveis Sólidos**

**Empresa: BOSCH Termotechnika s.r.o.**

*Manuel José Martins Miranda*

Projecto final do MIEM

Realizado ao abrigo do programa Erasmus - Estágios

Orientador na BOSCH Termotechnika s.r.o.: Eng. Dirk Hofmann

Orientador na FEUP: Prof. Carlos Pinho



**Universidade do Porto**

**FEUP** Faculdade de  
Engenharia

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
ENERGIA TÉRMICA

JANEIRO 2009

À minha Avó Júlia

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer ao Eng. Dirk Hofmann pelo apoio à realização do projecto na Bosch Termotechnika s.r.o., ao Eng. Lapis e ao Eng. Kocian pelo apoio, discussão e valorização do trabalho com eles realizado, ao Sr. Barina pelo apoio concedido na realização dos testes apesar da barreira linguística existente e a todos os que tornaram a minha estadia na República Checa mais agradável.

Agradecimentos ao Prof. Carlos Pinho que desde o início se mostrou disponível a orientar o projecto apesar das dificuldades e risco inerentes à condução de um projecto a longa distância, pelo apoio, conselhos e disponibilidade.

Agradeço à rede Erasmus que permite que todos os anos alunos de toda a Europa vivam o seu europeísmo.

Agradeço ao DCoop o seu apoio total na minha formação universitária, em especial à Dr. Fernanda Correia que tudo fez para que eu pudesse abraçar este projecto.

## Resumo

A subida dos preços do petróleo, as mudanças climáticas e o aumento da competitividade industrial a nível mundial exigem o desenvolvimento de novos produtos e a melhoria dos existentes. O aumento da eficiência, a diminuição das emissões gasosas e a redução de custos são as linhas mestras que comandam o desenvolvimento de produto na termotecnologia a nível mundial. Para que este desenvolvimento possa ocorrer, é necessário que as empresas conheçam melhor os seus produtos sendo esse o propósito deste projecto: o desenvolvimento de procedimentos e bancas de teste que permitam à Bosch Termotechnika s.r.o. conhecer melhor os seus produtos.

No seu âmbito, foi desenvolvida uma banca de testes em circuito fechado. Esta banca permitirá o teste de eficiência de caldeiras segundo a norma EN304 e a simulação da operação da caldeira em funcionamento real. Não foi possível a sua implementação devido à incapacidade dos fornecedores e instaladores de cumprir os prazos definidos.

Os procedimentos de testes de durabilidade definidos permitirão conhecer melhor o comportamento do produto ao longo da sua vida útil. Da análise destes testes, resultará a melhoria dos componentes que sofrem degradação precoce e a redução de custos nos componentes que se encontram sobredimensionados. Não foi possível a sua implementação pois estão enquadrados num projecto maior – a zona de testes de durabilidade – cuja construção se irá realizar apenas este ano.

Os critérios de robustez definidos permitirão melhorar a robustez do produto, aumentando o seu ciclo de vida e reduzindo a probabilidade de falhas das quais possam resultar danos materiais e humanos.

Finalmente, os testes de estanquicidade, de resistência à pressão hidráulica e de resistência à variação de pressão permitiram uma abordagem mais prática. Exigiram uma acção rápida, eficiente e pragmática, tendo-se encontrado soluções bastante satisfatórias para a estanquicidade da caldeira já implementadas em produção.

O presente projecto obteve resultados muito positivos ao melhorar significativamente a estanquicidade das caldeiras da gama Prexal. A médio prazo, a nova banca de testes, os testes de durabilidade e a compilação dos critérios de robustez permitirão a melhoria da fiabilidade, o aumento do ciclo de vida e a redução de custos dos produtos produzidos. A longo prazo, certamente que o presente projecto será fundamental para a sobrevivência da fábrica ao permitir o desenvolvimento de produtos mais robustos, mais eficientes e mais baratos.

## **Abstract**

The rising oil prices, the climate changes and the increasing global industrial competitiveness require the development of new products and the improvement of the existing ones. Increase of efficiency, reduction of gas emissions and reduction of costs are the guidelines that command the worldwide product development in thermotechnology. For this development to occur, companies are required to know better their products. That is the purpose of this project: the development of test procedures and test benches that allow Bosch Termotechnika s.r.o. to improve its products.

Taking that in mind, a closed circuit test bench was developed. The bench will allow the testing of boilers efficiency according to the EN304 standard and the simulation of the boiler real operation. It wasn't possible to implement it because the suppliers weren't capable to meet the deadlines.

The durability tests procedures that were set will allow to know better the performance of the product throughout its lifetime, resulting on the improvement of components with early degradation and on the cost reduction in oversized components. It wasn't possible to implement them because they are framed in a larger project - the area of durability tests – which construction will take place only this year.

The set of evaluation criteria will improve the product robustness, increasing its life cycle and reducing the probability of failure of which may result material and/or human damage.

Finally, the airleakage, the hydraulic pressure resistance and the hydraulic pressure change resistance tests led to a more practical approach demanding for a swift, efficient and pragmatic action. The testing benches and the problems resolution are quite satisfactory and were implemented in production.

In the short term, this project has already lead to very positive results by proposing solutions that will significantly improve the Prexal range of airtight boilers. In the medium term, the new testing bench, durability tests and robustness criteria compilation will improve the reliability, increase the life cycle and reduce costs of products produced. Over time, this project will certainly be crucial for the survival of the plant by enabling the development of more robust, more efficient and cheaper products.

# Conteúdos

1	Introdução.....	1
1.1	Energia .....	1
1.2	Energias Renováveis .....	4
1.2.1	Energia Hídrica .....	4
1.2.2	Energia Eólica .....	4
1.2.3	Energia Solar .....	5
1.2.4	Biocombustíveis .....	5
1.2.5	Biomassa .....	6
1.3	Empresa .....	9
1.4	O Projecto.....	10
1.4.1	Objectivos.....	11
2	Combustão.....	12
2.1	Combustíveis Sólidos .....	13
2.2	Aquecimento Central a Combustíveis Sólidos.....	16
2.3	Caldeiras a Combustíveis Sólidos .....	20
2.3.1	Caldeira Normal .....	20
2.3.2	Caldeira de Gaseificação .....	21
2.4	Gamas a Testar .....	23
2.4.1	Gama DOR.....	24
2.4.2	Gama FB .....	26
2.4.3	Gama PYRO.....	28
3	Teste de Eficiência e Emissões .....	30
3.1	Teste de Eficiência .....	30
3.1.1	Método Directo .....	30
3.1.2	Método Indirecto .....	32

3.2	Banca de Teste de Eficiência em Ciclo Fechado .....	34
3.2.1	Requisitos .....	35
3.2.2	Concepção .....	36
3.2.3	Seleção de Tubagem.....	38
3.2.4	Isolamento .....	39
3.2.5	Permutador de Calor.....	40
3.3	Esquema da Instalação .....	45
3.3.1	Função dos Componentes.....	46
3.3.2	Cálculo das Perdas de Carga .....	50
3.3.3	Seleção da Bomba .....	51
3.4	Instrumentação .....	53
4	Principais Causas de Falhas em Caldeiras a Combustíveis Sólidos.....	54
4.1	Corrosão .....	54
4.1.1	Oxidação.....	55
4.1.2	Sulfuração.....	55
4.1.3	Carbonização .....	56
4.1.4	Cinzas e Condensação .....	56
4.2	Erosão.....	57
4.3	Cargas Cíclicas de Origem Térmica.....	57
4.4	Efeito Combinado da Corrosão, Erosão e Cargas Cíclicas de Origem Térmica. 57	
4.4.1	Erosão-Corrosão.....	57
4.4.2	Fadiga-Corrosão .....	58
4.5	Fluência .....	59
5	Metodologia de Definição das Falhas - FMEA.....	61
6	Falhas a Avaliar em Testes de Durabilidade .....	64
6.1	Grelha de Suporte de Combustível.....	65

6.2	Injector de Ar .....	65
6.3	Permutador de Calor.....	66
7	Metodologia de Avaliação de Falhas .....	68
7.1	Requisitos .....	68
7.1.1	Qualificação da Mão-de-obra.....	68
7.1.2	Quantificação dos Resultados .....	69
7.1.3	Características a Analisar .....	69
7.2	Métodos Seleccionados .....	70
7.2.1	Permutador de Calor.....	70
7.2.2	Injector .....	70
7.2.3	Grelha .....	71
7.3	Pontos de Inspeção .....	72
7.4	Critérios de Aprovação.....	73
8	Teste de Durabilidade.....	74
8.1	Definição das Condições do Teste .....	74
8.2	Definição do Procedimento de Teste .....	74
8.3	Zona de Testes de Durabilidade .....	77
9	Critérios de Robustez .....	81
10	Estanquicidade da Gama de Caldeiras Prexal .....	85
10.1	Problema.....	85
10.2	Critérios de Aprovação.....	86
10.2.1	Estanquicidade da Caldeira .....	86
10.2.2	Resistência à Variação de Pressão Hidráulica.....	86
10.2.3	Resistência à Pressão Hidráulica.....	86
10.3	Bancas de Teste.....	87
10.3.1	Estanquicidade da Caldeira .....	87



10.3.2	Resistência à Variação de Pressão Hidráulica.....	88
10.3.3	Resistência à Pressão Hidráulica.....	88
10.3.4	Medição da Deformação Plástica.....	89
10.4	Resolução .....	90
10.5	Análise dos Resultados.....	96
10.6	Conclusões .....	98
11	Conclusões e Trabalhos Futuros .....	99
12	Refêrendias e Bibliografia.....	103
12.1	Sítios na Internet Consultados.....	104
Anexo A - Procedimento de Teste “Estanquicidade do Colector de Gases de Escape”. 105		
Anexo B - Exemplar de Folha de Cálculo de “Estanquicidade do Colector de Gases de Escape”.....		106
Anexo C - Banca de Teste “Resistência à Variação da Pressão Hidráulica”.....		109
Anexo D - Procedimento de Teste “Resistência à Variação de Pressão Hidráulica” .....		111
Anexo E - Exemplo de Relatório de “Estanquicidade do Colector de Gases de Escape” ....		113
Anexo F - Exemplo de Relatório de “Resistência a Variação de Pressão Hidráulica” ...		122
Anexo G - Exemplo de Relatório “Resistência à Pressão Hidráulica” .....		128
Anexo H – Critérios de Robustez – Procedimentos de Teste .....		135
Anexo I – Características de Válvulas .....		143

## Índice de Esquemas

Esquema 2.1 - Sistema de aquecimento central que integra caldeira a combustíveis sólidos e outro tipo de caldeira.....	19
Esquema 2.2 - Sistema de controlo de temperatura .....	19
Esquema 2.3 - Organização de uma caldeira genérica.....	20
Esquema 2.4 - Organização de uma caldeira normal .....	21
Esquema 2.5 - Arranque da combustão numa caldeira de gaseificação.....	22
Esquema 2.6 - Funcionamento de uma caldeira da gama DOR.....	25
Esquema 2.7 - Funcionamento de uma caldeira da gama FB .....	27
Esquema 2.8 - Funcionamento de uma caldeira da gama PYRO.....	29
Esquema 3.1 - Instalação de uma banca de eficiência em circuito fechado.....	31
Esquema 3.2 - Instalação de uma banca de eficiência em circuito aberto .....	31
Esquema 3.3 - Instalação de aquecimento central com uma caldeira a combustíveis sólidos.....	34
Esquema 3.4 - Exemplar de válvula (Zappe, 2009) .....	36
Esquema 3.5 - Permutador Alfa Laval CB14-14H .....	43
Esquema 3.6 - Permutador Alfa Laval CB27-34M.....	44
Esquema 3.7 - Banca de teste de eficiência em circuito fechado.....	45
Esquema 3.8 - Bomba WILO-TOP-S 40/7 .....	52
Esquema 7.1 - Método de medição da deformação da grelha.....	71
Esquema 8.1 - Planta da zona de durabilidade.....	77
Esquema 8.2 - Disposição da Zona de durabilidade .....	78
Esquema 8.3 - Disposição (ou traçado) do sistema de tubagens.....	78
Esquema 8.4 - Pormenor da ligação da caldeira ao sistema de tubagens.....	79
Esquema 8.5 - Posicionamento do sistema de exaustão da área de durabilidade .....	79
Esquema 8.6 - Estrutura de suporte para caldeiras até 500kg.....	80

Esquema 8.7 - Estrutura de suporte para caldeiras até 1000kg .....	80
Esquema 10.1 - Logano 120kW a 2000kW .....	85
Esquema 10.2 - Bancas de teste para 'Estanquicidade da caldeira' .....	87
Esquema 10.3 - Banca de teste para 'Resistência à Pressão Hidráulica' .....	88
Esquema Anexo C.1 - Versão simplificada da banca de teste para “Resistência à Variação de Pressão Hidráulica” .....	109
Esquema Anexo I.1 - Válvula corredeira (Zappe, 1999).....	144
Esquema Anexo I.2 - Válvula de globo (Zappe, 1999).....	145
Esquema Anexo I.3 - Válvula anti-retorno (Zappe, 1999).....	146
Esquema Anexo I.4 - Válvula de macho esférico (Zappe, 1999) .....	147
Esquema Anexo I.5 - Válvula borboleta (Zappe, 1999) .....	148
Esquema Anexo I.6 - Válvula diafragma (Zappe, 1999) .....	149

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Lareira com sistema de aquecimento de água .....	16
Figura 2.2 - Fogão a lenha com sistema de aquecimento de água .....	17
Figura 2.3 - Fogão de sala com sistema de aquecimento de água.....	17
Figura 2.4 - Caldeira a combustíveis sólidos independente .....	18
Figura 3.1 - Exemplar de permutador água-ar (Alfa Laval, 2004) .....	40
Figura 3.2 - Exemplares de permutadores água-água (Alfa Laval, 2004) .....	41
Figura 6.1 - Grelha de combustível.....	65
Figura 6.2 - Injector da gama PYRO após 5 anos de utilização.....	66
Figura 6.3 - Permutador de calor da Gama FB .....	67
Figura 10.1 - Frente da caldeira com indicação da designação atribuída aos cantos .....	89
Figura 10.2 - Pormenor do canto do colector de gases de combustão soldado.....	93
Figura 10.3 - Da esq. para a dir. – De série; Em cruz; Raio menor; Raio maior .....	94
Figura 10.4 - Silicone vedante utilizado na vedação do colector dos gases de combustão .....	95
Figura Anexo A.1 - Fita metálica no adaptador do colector de gases de exaustão .....	105
Figura Anexo A.2 - Fita metálica no adaptador do queimador .....	105
Figura Anexo D.1 - Banca de teste para “Resistência à Variação de Pressão Hidráulica” .....	109
Figura Anexo D.1 - Ligação à purga da caldeira .....	111
Figura Anexo D.2 - Adaptadores das conexões de entrada e saída de água da caldeira.	111
Figura Anexo D.3 - Visão superior da instalação da caldeira.....	112

## Índice de Gráficos

Gráfico 1.1 - Evolução do consumo de energia primária por origem em Portugal (IEA, 2009).....	2
Gráfico 1.2 - Simulação dos gastos em aquecimento para um consumo de 120GJ e um espaço aquecido de 130m <sup>2</sup> (ATMOS, 2008).....	7
Gráfico 3.1 - Curvas características da bomba Wilo-TOP-S 40/7 .....	51
Gráfico 3.2 - Consumo energético da bomba WILO-TOP-S 40/7 .....	52
Gráfico 4.1 - Relação entre tensão aplicada e n.º de ciclos para a ruptura em ambientes corrosivos (Talbot, 2006) .....	59
Gráfico 4.2 - Relação genérica entre temperatura, tensão e tempo para a ruptura (Talbot, 2006).....	60
Gráfico 10.1 - Estanquicidade da caldeira original .....	90
Gráfico 10.2 - Estanquicidade após teste de " Resistência à Variação de Pressão Hidráulica" .....	91
Gráfico 10.3 - Estanquicidade após teste de " Resistência à Pressão Hidráulica" .....	92
Gráfico 10.4 - Estanquicidade após a soldadura dos cantos do colector de gases de combustão.....	93
Gráfico 10.5 - Estanquicidade da caldeira para as diferentes concepções da corda .....	94
Gráfico 10.6 - Evolução da deformação ao longo dos diferentes testes .....	96
Gráfico 10.7 - Evolução do volume de fuga de ar ao longo dos testes .....	96
Gráfico 10.8 - Relação entre a concepção do vedante e o rácio de fugas .....	97
Gráfico Anexo C.1 - Perfil do ciclo de pressões desejado .....	110

## Índice de Tabelas

Tabela 1.1 - Simulação dos gastos em aquecimento para um consumo de 120GJ e um espaço aquecido de 130m <sup>2</sup> (ATMOS, 2008).....	6
Tabela 2.1 - Reservas mundiais de carvão no final de 2005 (World Energy Council, 2007) .....	13
Tabela 2.2 - Composição típica dos diferentes tipos de combustíveis sólidos (CEN, 1994) .....	15
Tabela 2.3 - Ar teórico de combustão para diferentes combustíveis sólidos (ASHRAE, 2001).....	15
Tabela 2.4 - Percentagem de CO <sub>2</sub> para um dado excesso de ar para diferentes combustíveis (ASHRAE, 2001) .....	15
Tabela 2.5 - Características das caldeira da gama DOR .....	24
Tabela 2.6 - Características das caldeiras da gama FB .....	26
Tabela 2.7 - Características das caldeiras da gama PYRO .....	28
Tabela 3.1 - Distância entre apoios para diferentes tamanhos de tubagens e espessuras de isolamento (Nayyar, 2000) .....	38
Tabela 3.2 - Espessura de isolamento para diferentes tipos de tubagens e temperaturas de operação (Nayyar, 2000) .....	39
Tabela 3.3 - Características do Permutador Alfa Laval CB27-34M .....	41
Tabela 3.4 - Características do permutador Alfa Laval CB-14M .....	42
Tabela 3.5 - Perdas de carga do sistema para os caudais mínimo e máximo.....	50
Tabela 3.6 - Dimensões e peso da bomba WILO-TOP-S 40/7 .....	52
Tabela 3.7 - Características da Bomba Wilo TOP-S 40/7.....	53
Tabela 5.1 - Definição do grau de criticidade do problema (Bosch, 2007) .....	62
Tabela 5.2 - Métodos de inquisição da probabilidade de ocorrência de uma falha (Bosch, 2007).....	63
Tabela 9.1 - Critérios de robustez, seus objectivos, critérios de aprovação e origem – n.º1 a 9 .....	82

Tabela 9.2 - Critérios de robustez, seus objectivos, critérios de aprovação e origem – n.º10 a 17 .....	83
Tabela 9.3 - Critérios de robustez, seus objectivos, critérios de aprovação e origem – n.º19 a 29 .....	84
Tabela 10.1 - Deformação original do painel frontal .....	90
Tabela 10.2 - Fugas de ar: janela de inspecção (à dir.) e cantos do colector de gases de combustão (à esq.).....	91
Tabela 10.3 - Deformação do painel frontal após teste de "Resistência à Variação de Pressão Hidráulica" .....	91
Tabela 10.4 - Deformação após teste de "Resistência à Pressão Hidráulica" .....	92
Tabela 10.5 – Fuga de ar para as diferentes concepções.....	94
Tabela Anexo I.1 - Perda de carga para diferentes tipos de válvulas, ligações e diâmetros (ASHRAE, 2001) .....	150
Tabela Anexo I.2 - Gama de variação da perda de carga para diferentes tipos de válvulas e ligações (ASHRAE, 2001) .....	150
Tabela Anexo I.3 - Características dos diferentes tipos de válvulas (Zappe, 1999) .....	151

# 1 Introdução

## 1.1 Energia

Nos últimos 200 anos, a satisfação das necessidades energéticas da humanidade assentaram na utilização do petróleo e nos seus derivados. O seu preço reduzido, o alto rácio da energia obtida pela energia dispendida na sua extracção, a tecnologia simples usada na sua utilização e a ideia utópica de que as reservas eram inesgotáveis fizeram com que facilmente a humanidade se tornasse dependente deste combustível fóssil.

Porém, nos anos 70, surgiu o primeiro aviso de que nem sempre esta dependência seria pacífica. A OPEP cortou a produção de petróleo, fazendo com que os preços subissem mais de 400%, instalando o caos mundial, com racionamento de combustível e longas filas de espera nos postos de abastecimento.

A crise passou, a utilização irracional continuou. Porém alguns países, conscientes da sua dependência, começaram a diversificar as suas fontes de energia, como é o caso da Dinamarca com a energia eólica, a Grécia com a energia solar térmica e a França com a energia nuclear. Parte da Europa passou a efectuar o aquecimento de edifícios através de gás transportado por gasodutos vindos da Rússia, no caso da Europa Central e Ocidental, e a partir do norte de África, no caso dos países da Europa meridional.

Durante os anos 90, os baixos preços do petróleo, fizeram com que as empresas do sector desinvestissem na renovação das plataformas de extracção de petróleo e que só se apostasse na prospecção de novas jazidas de petróleo em áreas promissoras. Este facto levou a que a capacidade de produção não acompanhasse as necessidades de consumo.

No final dos anos 90, países como a China, a Rússia, Índia e Brasil, ao apostarem numa economia de mercado e ao estabilizarem a sua situação política, começaram a sofrer um forte crescimento da economia, fazendo com que a procura do petróleo aumentasse, distorcendo o mercado.

Com o grande crescimento económico, veio também a sede de poder. A China, com grande volume de exportações, acumulou valores recorde de divisas estrangeiras, utilizando esse dinheiro para investir em países ricos em petróleo, como Angola, onde, ao contrário dos países ocidentais, não impõe contrapartidas políticas, tornando-se num investidor prioritário. A Rússia, consciente da dependência europeia do gás russo, saudosa do poder político da era da URSS, chantageia a Europa com cortes de fornecimento. Quando o gasoduto que irá ligar a



Rússia à China e ao Japão estiver terminado, a Rússia já não necessitará da Europa para escoar a sua produção de gás. O Brasil, que recentemente entrou na OPEP, possui ainda uma produção de etanol, substituto biológico da gasolina, e biodiesel assinaláveis. Estabelece acordos com os EUA, onde pede sempre em troca algum poder político.

O aumento da procura mundial, a instabilidade no Médio Oriente, o desinvestimento dos anos 90, a mudança de balanços políticos a nível mundial, o surgimento de novas potências económicas, acompanhado pela especulação que as novas tecnologias de informação permitem, levaram a que o petróleo atingisse valores recorde em Julho de 2008.

A crise causada pelo aumento do preço do petróleo leva a humanidade de volta aos anos 70, porém desta vez não se trata de uma questão política, mas sim de uma situação estrutural da económica energética a nível mundial.

Há necessidade de maior investimento em energias de fontes renováveis – eólica, solar, das ondas, hidroelétrica, energia nuclear – fissão e fusão nuclear e energia obtida através da biomassa e em eficiência energética.

Portugal, apesar de ter um rácio de utilização de energias renováveis na produção de electricidade acima da média europeia, ainda está longe de ser eficiente na utilização dos seus recursos e da energia final.

No gráfico seguinte, é possível ver a evolução do consumo de energia primária em Portugal (IEA, 2009).

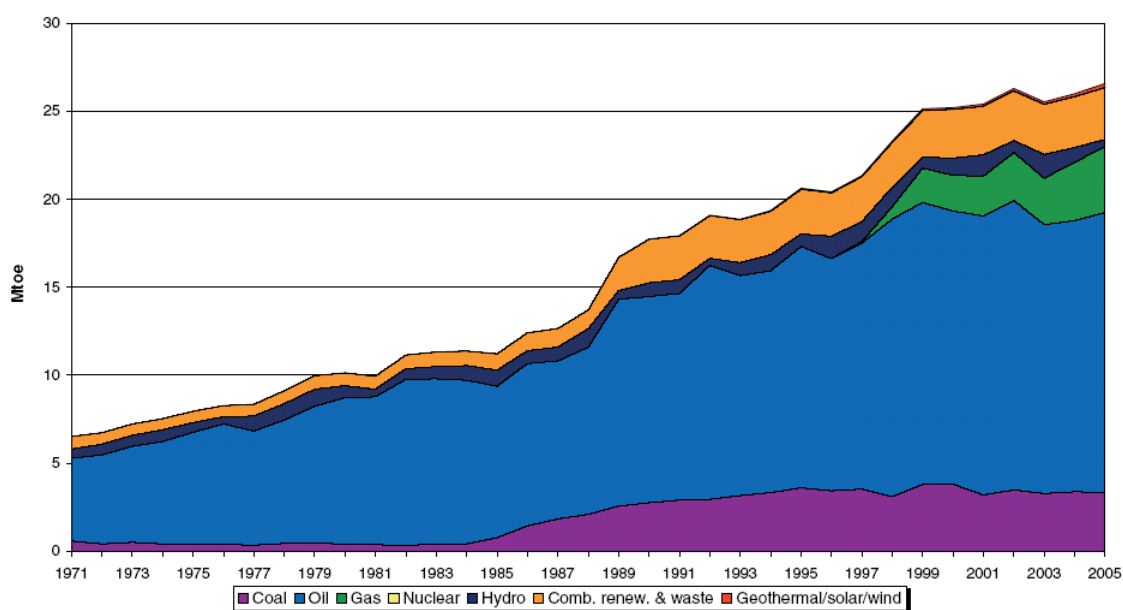


Gráfico 1.1 - Evolução do consumo de energia primária por origem em Portugal (IEA, 2009)

Ao nível dos transportes, a preferência que os governos deram ao transporte rodoviário face ao ferroviário, a baixa eficiência energética das casas – desde o mau isolamento à utilização de lareiras tradicionais e à fraca utilização de energia solar – chocante a nossa posição em relação a Grécia, fazem com que sejamos um dos países da Europa que mais consomem energia por riqueza criada. Tudo isto resulta no mau conforto térmico que os edifícios portugueses têm durante o inverno, onde somente uma pequena percentagem possui aquecimento central (INE, 2002).

Visto que é necessário utilizar mais eficientemente os recursos energéticos, as estratégias a serem definidas para a sua melhor gestão são (IEA, 2006):

- A introdução de leis que aumentem o padrão de eficiência energética de edifícios (exemplo: RCCTE) e de equipamentos;
- Criação de incentivos fiscais e sociais à melhor utilização da energia;
- Investimento na rede de transportes públicos;
- Criação de equipas de gestão de energia nas empresas, nos poderes locais e nacionais;
- Investigação e desenvolvimento de produtos mais eficientes e de metodologias de gestão da rede energética.

## **1.2 Energias Renováveis**

As energias renováveis podem ser de origem:

- Hídrica;
- Eólica;
- Solar – térmico, fotovoltaico ou híbrido;
- Biocombustíveis;
- Biomassa.

### **1.2.1 Energia Hídrica**

A tecnologia que suporta o aproveitamento hídrico para produção de electricidade é uma tecnologia muito madura, com rendimentos que rondam os 100%. O aproveitamento das grandes linhas de água já foi realizado há várias décadas, sendo que actualmente a prioridade é o aproveitamento de cursos de água menos rentáveis.

O impacto ambiental e social deste tipo de infra-estruturas é elevado, levando à destruição de habitats naturais e à deslocação das populações circundantes. A aprovação de novos empreendimentos exigirá uma certa flexibilização por parte das entidades competentes, até porque, face ao aumento das necessidades de água potável, as barragens terão grande importância no futuro.

A energia produzida através deste recurso tem preços competitivos quando comparada com centrais térmicas a carvão e a gás.

### **1.2.2 Energia Eólica**

A energia eólica utiliza uma tecnologia madura, apesar de existirem progressos recentes na sua eficiência. As dificuldades associadas a este tipo de tecnologia são a fraca relação existente entre a energia produzida e a área necessária à sua instalação, a previsão da energia produzida e o seu impacto ambiental. As metodologias de avaliação, simulação e previsão dos recursos eólicos têm evoluído nos últimos anos.

### 1.2.3 Energia Solar

A energia solar térmica é uma tecnologia muito madura com retorno do investimento ao fim de poucos anos. Infelizmente, em Portugal, quer por razões políticas – demora na obrigatoriedade de painéis solares para aquecimento de AQS (Aquecimento de águas sanitárias) – quer por razões técnicas – inexistência de técnicos qualificados no início dos anos 90 levou a experiências decepcionantes por parte de muitos utilizadores finais, conduzindo a uma ideia generalizada de que a tecnologia era fraca, este tipo de tecnologia tem penetração quase irrelevante no mercado. Nos últimos anos, com o aumento do preço dos combustíveis, a introdução de novas leis e benefícios fiscais, o interesse por este tipo de produtos voltou a despertar.

O desenvolvimento de novos materiais e sistemas inteligentes de controlo permitirá num futuro não muito distante, a cobertura de 100 % das necessidades energéticas para AQS.

A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia que apesar de existir no mercado há bastantes anos, pode e precisa de ter algumas melhorias. A utilização de materiais nobres e a alta tecnologia necessária à sua produção fazem com que seja a energia eléctrica mais cara do sistema energético.

Actualmente, encontram-se em desenvolvimento painéis solares híbridos que conjugam num só equipamento painéis solares térmicos e painéis solares fotovoltaicos. A água que circula no painel solar térmico vai reduzir a temperatura das células fotovoltaicas, aumentando deste modo a eficiência geral do sistema para cerca de 90 %.

### 1.2.4 Biocombustíveis

Os biocombustíveis são uma forma de energia bastante controversa, por entrarem em conflito com a alimentação humana, por terem um rendimento muitíssimo inferior ao das células fotovoltaicas, por terem um rácio de energia obtida/ energia utilizada na produção bastante baixo e por ser duvidoso que realmente seja um substituto do petróleo visto que são utilizados fertilizantes derivados do petróleo na sua produção. Deverão possuir um papel importante, numa fase inicial de transição entre economia de petróleo e economia sem petróleo, poderão ser importantes na reciclagem de óleos utilizados na indústria alimentar e no aproveitamento de resíduos agrícolas mas a sua aplicabilidade deverá, no futuro, concentrar-se em nichos de mercado e aplicações específicas.

### 1.2.5 Biomassa

Biomassa é qualquer material de origem biológica que pode ser usado com combustível – incluindo erva, milho, madeira ou biogás assim como resíduos florestais e agrícolas.

Trata-se de fazer o aproveitamento energético de um combustível que caso contrário será decomposto pela natureza sem benefício da humanidade. Os seus principais problemas são a sua fraca densidade energética, a variabilidade das características do combustível – composição e teor de humidade, e o tratamento final das cinzas.

Em seguida, é apresentado um quadro com as poupanças que são possíveis de realizar com o recurso a biomassa para o aquecimento central (ATMOS, 2008).

Combustível	Poder calorífico médio	Preço médio Combustível 1.1.2008	Eficiência Média	Consumo anual de combustível	Custo total da estação de aquecimento [€]
Madeira	14,8 MJ/kg <sup>1</sup>	21 €/pilha de m <sup>3</sup>	Caldeira Pirolítica - 85%	9,5 t	437
Carvão betuminoso	18 MJ/kg <sup>1</sup>	87-117 €/t	Caldeira Pirolítica - 85%	7,9 t	691 - 921
Pellets	18 MJ/kg <sup>1</sup>	125-188 €/t	Caldeira Pirolítica - 91%	7,4 t	925 - 1387
Briquettes	18 MJ/kg <sup>1</sup>	125-188 €/t	Caldeira Pirolítica - 85%	7,9 t	987 - 1480
Gás Natural	33,7 MJ/m <sup>3 1</sup>	41 €/MWh 0,43 €/m <sup>3</sup>	Caldeira de Condensação - 105%	3390 m <sup>3</sup>	1455
			Caldeira Clássica - 90%	3960 m <sup>3</sup>	1700
Acumulador de Calor - Electricidade	3,6 MJ/kWh	0,0059 €/kWh	98%	34 010 kWh	2012
Resistência Eléctrica	3,6 MJ/kWh	0,075 €/kWh	99%	33 670 kWh	2511
Light fuel oil	42 MJ/kg <sup>1</sup>	0,63 - 0,79 €/kg	90%	3180 kg	1987 - 2517
Propano-butano	46 MJ/kg <sup>1</sup>	0,71 - 0,96 €/kg	90%	2900 kg	2054 - 2779

**Tabela 1.1 - Simulação dos gastos em aquecimento para um consumo de 120GJ e um espaço aquecido de 130m<sup>2</sup> (ATMOS, 2008)**

---

<sup>1</sup> Poder Calorífico Inferior

Os resultados podem ser sintetizados no seguinte gráfico.

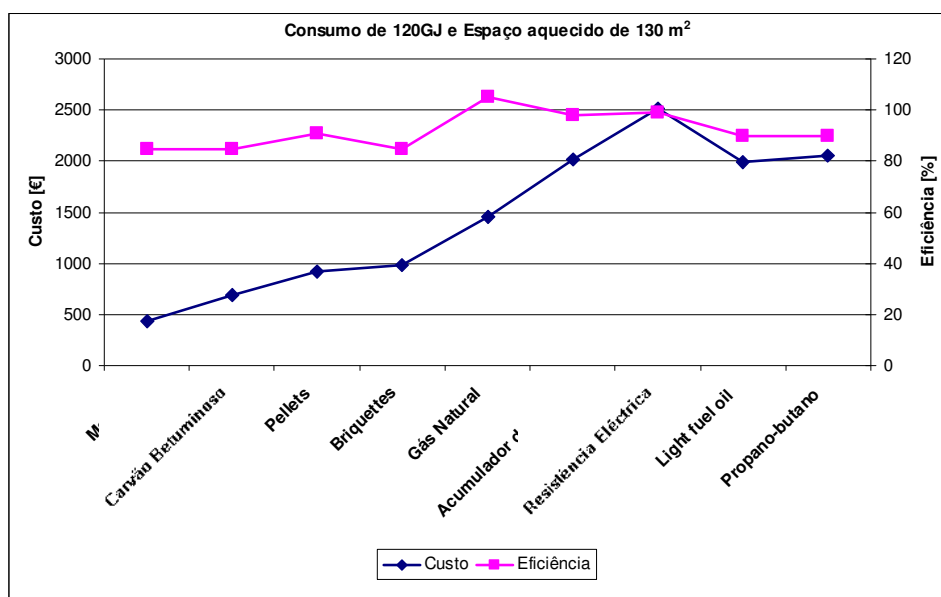


Gráfico 1.2 - Simulação dos gastos em aquecimento para um consumo de 120GJ e um espaço aquecido de 130m² (ATMOS, 2008)

### 1.2.5.1 Biomassa em Portugal

A utilização de biomassa como recurso energético tem vindo a aumentar em Portugal nos últimos anos como resultado de um maior investimento em centrais térmicas que queimam resíduos florestais e aproveitamento de lixos municipais.

Em 2005, a utilização de biocombustíveis e resíduos urbanos constituiu cerca de 10 % do consumo total de energia primária. Os responsáveis por este consumo foram (IEA, 2006):

- Indústria com 46% do consumo total
  - Produção de calor de processo a partir de resíduos industriais;
- Sector residencial com 40% do consumo total
  - Produção de calor com recurso a lareiras e fogões a lenha;
- Centrais de cogeração com 6% do consumo total;
- Centrais de produção eléctrica com 8% do consumo total.

Os valores de utilização de biomassa são semelhantes ao uso mundial de biomassa, 10% do consumo de energia primária total, onde os principais responsáveis pelo consumo foram a indústria, produção de electricidade e de calor, os transportes e o sector residencial. Porém o consumo de biomassa em Portugal é bastante superior à média europeia, 5 %.

Em 2005, a capacidade de produção eléctrica a partir de biomassa e de resíduos urbanos era de 473 MW com as seguintes proporções:

- Biomassa com cogeração - 3%;
- Biomassa sem cogeração - 74%;
- Biogás - 2%;
- Resíduos urbanos - 20%.

Tendo em conta que o sector residencial é responsável por 40% do consumo de biomassa, que a tecnologia utilizada no seu aproveitamento são fogões a lenha e lareiras e que este tipo de tecnologia tem eficiências entre os 40% e os 50%, se este tipo de tecnologia fosse substituída por caldeiras a combustíveis sólidos com eficiências na ordem dos 80%, teríamos um ganho anual de 350 tep em energia final.

### 1.3 Empresa

Em 1949, a Dakon foi criada por 5 empreendedores cujas iniciais dos seus nomes deram origem ao nome da empresa.

Em 2003, a Buderus adquiriu a Dakon com o objectivo de completar a sua gama de produtos de aquecimento de águas e para melhor penetrar no mercado emergente da Europa de Leste.

No mesmo ano, a Bosch Termotecnik compra a Buderus, passando a Dakon a integrar este grupo multinacional.

Em 2008, a Dakon adopta o nome de Bosch Termotechnika s.r.o..

A Bosch Termotechnika s.r.o. localiza-se em Krnov, na República Checa, a menos de 400km de Praga, Budapeste, Bratislava, Varsóvia e Viena. Dedica-se à produção de caldeiras eléctricas, a gás, a combustíveis líquidos e a combustíveis sólidos, como potências que variam entre os 5kW e os 3MW. Emprega mais de 500 colaboradores e tem uma produção anual de 36.000 caldeiras a combustíveis sólidos. Produz equipamentos sob a marca Buderus, Bosch e Dakon.

Apesar de grande parte da produção se destinar aos países da ex-URSS, onde a exigência sobre a qualidade do produto não é muita, após a integração da empresa no prestigiado grupo Bosch, os critérios de qualidade do produto aumentaram. Tornou-se necessário conhecer melhor o produto, apostar no desenvolvimento e na concepção.



### 1.4 O Projecto

As caldeiras comercializadas pela Bosch Termotechnika s.r.o. têm, no utilizador final, uma durabilidade que ronda os 5 anos. Um valor aceitável visto que as caldeiras trabalham cerca de 2000 h/ano e são sujeitas a condições de utilização real muito agressivas, operação a baixa temperatura – 50 °C - que originam problemas de condensação e utilização de combustíveis não recomendados, por exemplo é utilizada muitas vezes na incineração de lixo.

Visto que existem novas exigências ambientais e de eficiência energética como demanda da legislação introduzida pela União Europeia e do mercado, é necessário criar novos produtos e melhorar os existentes.

No desenvolvimento de produto, do ponto de vista da análise da eficiência e da durabilidade do produto, existem três tipos de testes fundamentais:

- Teste de eficiência - permite observar a evolução da eficiência da caldeira ao longo do seu ciclo de vida;
- Teste de durabilidade - permite simular, num período mais reduzido de tempo, a operação da caldeira no utilizador final;
- Teste de campo - permite observar as falhas que se verificam em operação real - falhas electrónicas, fugas, corrosão e operatividade.

No laboratório da empresa, existiam duas bancas de ensaios com circuito de água aberto onde eram feitos diariamente testes de eficiência e ocasionalmente testes de durabilidade.

Os testes de durabilidade realizados ocasionalmente não seguiam qualquer procedimento. Havia a necessidade do desenvolvimento de um documento que orientasse os testes de durabilidade na sua generalidade e de procedimentos de teste específicos para cada gama de caldeiras. O número de bancas disponíveis não permitiam prolongar os testes de durabilidade durante o período necessário, havendo necessidade de criar uma zona de testes exclusiva da durabilidade.

As bancas em ciclo aberto permitem o teste das caldeiras nas condições segundo a norma DIN EN 303 - 5 mas impedem a simulação da caldeira em funcionamento real - normalmente as caldeiras são instaladas em ciclo fechado.

### 1.4.1 Objectivos

Os objectivos subjacentes a este projecto são:

- Definição de procedimentos de teste de durabilidade - um procedimento geral que funcionará como referência para futuros testes e procedimentos específicos para as gamas das caldeiras já existentes;
- Definição da nova zona de testes de durabilidade - definir a disposição do laboratório, definir pontos de acesso à rede de água e ao esgoto e definir a instrumentação necessária;
- Projectar uma banca de ensaio de eficiência em ciclo fechado - definir os componentes necessários - válvulas, tubagens, instrumentação, bombas e permutadores.
- Definição dos critérios de robustez - definir testes que permitam elevar a longevidade e fiabilidade do produto final;
- Efectuar testes de “Estanquicidade da Gama Prexal”, “Resistência à variação de pressão” e “Sobrepresão hidráulica”.

## 2 Combustão

A combustão designa a combinação química rápida na qual o oxigénio se combina rapidamente com um combustível, constituindo uma reacção de oxidação.

Na combustão de combustíveis sólidos, a combustão não se dá directamente. Inicialmente, os combustíveis sofrem uma degradação térmica, a pirólise, da qual surgem produtos gasosos e vapores que são combustíveis. Após a pirólise, para que possa ocorrer a combustão, umas das seguintes condições terá que existir: uma chama piloto que permita ocorrência de combustão ou a temperatura dos produtos de pirólise é suficientemente elevada para que a combustão espontânea ocorra. No caso da madeira, o calor que a chama piloto terá que fornecer será 0,3 cal por centímetro quadrado por segundo, para que ocorra combustão espontânea é necessário 0,6 cal por centímetro quadrado por segundo (Browne, 1958).

Sob as condições apropriadas, estes produtos podem queimar e, se o calor retido pelo combustível for o suficiente para manter a pirólise, a queima continuará até que o combustível seja totalmente consumido, exceptuando os compostos inorgânicos que originarão as cinzas.

A combustão de combustíveis sólidos em caldeiras tem duas vertentes:

- Caldeira normal - a energia irradiada pelo combustível é suficiente para que, após a pirólise, ocorra a combustão espontânea;
- Caldeira de gaseificação - a pirólise realiza-se numa câmara na ausência de ar, após a formação dos produtos de pirólise, estes são transportados por ventilação forçada para uma câmara secundária, onde ocorre a mistura com ar e se realiza a sua combustão.

## **2.1 Combustíveis Sólidos**

Os combustíveis sólidos podem ter origem:

- Fóssil - carvão, coque e betume;
- Biológica - madeira, briquettes e pellet.

O carvão é uma mistura de carbono, hidrogénio, oxigénio, azoto, enxofre, água e cinzas. Visto que não é uma substância pura nem tem uma composição uniforme, não é possível atribuir-lhe uma fórmula química bem definida.

As reservas mundiais de carvão podem ver verificadas na tabela seguinte.

<b>Combustível</b>	<b>Reservas (milhões de ton)</b>
<b>Carvão Betuminoso</b>	430 896
<b>Carvão Semi-betuminoso</b>	266 837
<b>Lenhite</b>	149 755
<b>Turfa</b>	5267

**Tabela 2.1 - Reservas mundiais de carvão no final de 2005 (World Energy Council, 2007)**

Existem vários tipos de carvão, antracite, hulha, lenhite e turfa, diferindo entre si na sua composição química, humidade e teor em cinzas, o que influencia o seu valor energético.

A antracite é uma forma dura e compacta de carvão com alto lustre. É o carvão com maior percentagem de carbono, entre 92% e 98%, e o tipo de carvão com menos impurezas apesar do seu baixo valor calorífico.

O carvão betuminoso (hulha) possui entre 60 a 80% de carvão, sendo o restante água, ar, hidrogénio e enxofre. Possui uma cor negra ou castanho escura e possui uma densidade de 1,3.

Lenhite é um tipo de carvão suave com cerca de 60% de composição em carbono e até 19% em cinzas. Devido à sua baixa densidade não é rentável o seu transporte pelo que normalmente as centrais eléctricas que o utilizam localizam-se nas proximidades dos locais de onde é extraído.

Turfa é o tipo de carvão mais pobre mas também o mais comum no planeta constituindo cerca de 2% da superfície terrestre (World Energy Council, 2007).

O coque é um resíduo sólido da destilação de certos tipos de carvão. A matéria combustível é constituída pelo carbono fixo remanescente uma vez que se libertam as matérias voláteis. Tem uma densidade de 0,77.

As características da madeira diferem bastante de espécie para espécie, não só nas características químicas mas também na estrutura. A madeira pode surgir na sua forma original, de lascas, de serrim, pellets e briquettes de madeira.

A pellet é uma forma comprimida e de tamanho uniforme de biomassa, o que a torna mais simples de utilizar e armazenar que a maioria dos restantes combustíveis sólidos. A tecnologia que utilizada pellets para aquecimento é simples, autónoma e de reduzida manutenção.

Os benefícios no uso deste tipo de combustíveis são (Massachusetts Division of Energy Resources, 2007):

- Redução do impacto ambiental - chuvas ácidas e aquecimento global;
- Estabilidade dos preços - é improvável que no futuro impostos sobre a emissão de carbono ou sobre a energia venham a aumentar sobre a biomassa, ao contrário do que deverá acontecer com os combustíveis fósseis;
- São fáceis de usar e armazenáveis em menos espaço que outros tipos de biomassa;
- Possuem um conteúdo energético alto e a tecnologia que os utiliza possui uma alta eficiência energética quando comparada com outros tipos de biomassa;
- Queima pouco poluente e fonte renovável de energia;
- Produzidos a partir de resíduos florestais, agrícolas e industriais;
- Preços menos voláteis que os combustíveis sólidos.

As briquettes de madeira podem ser produzidas de resíduos florestais e industriais através da sua compressão, sem adição de quaisquer aditivos. A qualidade do briquette é bastante importante, o briquette não deverá partir-se durante a queima. A formação de pedaços desagregados de briquettes podem entupir a admissão de ar.

## Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos

Em seguida, é apresentado um quadro com a composição típica dos diferentes tipos de combustíveis.

Combustível		Água (as fired basis)	Cinzas (as fired basis)	Compostos Voláteis (as fired basis)	Poder Calorífico Inferior Huwf	
Carvão Betuminoso	a1	≤ 11%	2% a 7%	15% a 30%	>28 000 kJ/kg	
	a2			>30%		
Lenhite (incl. briquettes)	b1	≤ 20%	5% a 20%	40% a 50%	>12 500 kJ/kg	
	b2			50% a 60%		
Coque	c1	≤ 5%	5% a 15%	<6%	>28 000 kJ/kg	
	c2			8%±2%		
Antracite		d	≤ 5%	5%±3%	<10%	19 000 kJ/kg ± 5%
Madeira	Macia	A1	12% a 20%	≤0,4%		18 000 kJ/kg ± 5%
	Dura	A2	12% a 20%	≤0,4%		18 000 kJ/kg ± 5%
Lascas de Madeira		B1	20% a 30%	≤0,4%		18 000 kJ/kg ± 5%
		B2	40% a 50%	≤0,4%		18 000 kJ/kg ± 5%
Briquettes de Madeira		C	≤12%	≤0,5%		18 000 kJ/kg ± 5%
Serrim		D	35% a 50%	≤0,5%		18 000 kJ/kg ± 5%

**Tabela 2.2 - Composição típica dos diferentes tipos de combustíveis sólidos (CEN, 1994)**

Tipo de Combustível	Ar teórico para a combustão
<i>Combustível Sólido</i>	<i>kg/kg combustível</i>
Antracite	9,6
Carvão Semi-betuminoso	11,2
Carvão Betuminoso	10,3
Lenhite	6,2
Coque	11,2

**Tabela 2.3 - Ar teórico de combustão para diferentes combustíveis sólidos (ASHRAE, 2001)**

Tipo de Combustível	Teórico CO <sub>2</sub> , %	Percentagem CO <sub>2</sub> para um dado Excesso de Ar		
		20%	40%	60%
Carvão Betuminoso	18,2	15,1	12,9	11,3
Antracite	20,2	16,8	14,4	12,6
Coque	21,0	17,5	15,0	13,0

**Tabela 2.4 - Percentagem de CO<sub>2</sub> para um dado excesso de ar para diferentes combustíveis (ASHRAE, 2001)**

## 2.2 Aquecimento Central a Combustíveis Sólidos

O aquecimento central através de caldeiras a combustíveis sólidos usa o mesmo tipo de tubagens e radiadores, incluindo piso radiante, que outro qualquer combustível e podem ter sistemas semelhantes de controlo automático de potência e tempo.

Porém existem duas diferenças importantes:

- A maioria das caldeiras a combustíveis sólidos usam termóstatos mecânicos internos, fazendo com que o controlo seja efectuado sobre o circuito de aquecimento e não sobre a caldeira;
- Apesar de a combustão poder ser diminuída, não é possível pará-la completamente, sendo necessário existir um dispositivo de segurança que arrefeça a caldeira em caso de excesso ocasional de calor.

Existem quatro tipos de caldeiras a combustíveis sólidos.

As lareiras com sistema de aquecimento de água podem atingir eficiências de 70% e potências até 10kW. Porém não possuem sistema de controlo automático de temperatura, edifícios bem isolados podem ter dificuldade na extracção de fumos e podem provocar problemas na qualidade do ar interior. Este tipo de sistemas também não possui alimentação automática de combustível pelo que é recomendado o uso de combustíveis minerais que aumentam os intervalos em que a caldeira tem que ser realimentada.



**Figura 2.1 - Lareira com sistema de aquecimento de água**

Este tipo de caldeiras é muitas vezes escolhida porque, além de permitirem o aquecimento central, conferem um ambiente aconchegante.

Os fogões a lenha constituem outro tipo de caldeiras a combustíveis sólidos. Estes possuem no seu interior um sistema de tubagens que permite a troca de calor entre a câmara de combustão e a água do circuito de aquecimento central.

Possuem potências até 20kW e podem possuir controlo termoestático. Não possuem alimentação automática pelo que necessitam de um reabastecimento regular de combustível.



**Figura 2.2 - Fogão a lenha com sistema de aquecimento de água**

Fogões de sala com sistema de aquecimento de água podem ser colocados isoladamente ou encastrados na parede. A maioria possui controlo termoestático e alguns possuem alimentação automática.



**Figura 2.3 - Fogão de sala com sistema de aquecimento de água**

Caldeiras a combustíveis sólidos independentes são o tipo de caldeiras sobre o qual este projecto se vai debruçar. Tratam-se das caldeiras mais avançadas que existem que podem possuir potências até 100kW e eficiências até 92%. Podem funcionar sobre dois tipos de



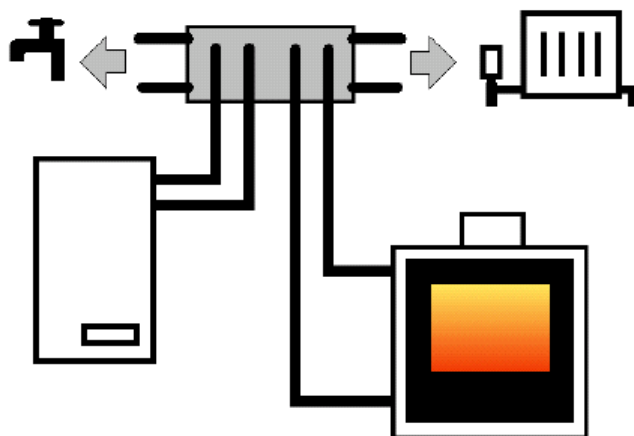
combustão, combustão normal e combustão pirolítica. Estão disponíveis no mercado com sistemas de alimentação automática, regulação automática de temperatura e, por regulação comunitária, possuem sistemas de segurança que arrefecem automaticamente a caldeira em caso de sobreaquecimento. Podem funcionar com inúmeros combustíveis, minerais e vegetais.



**Figura 2.4 - Caldeira a combustíveis sólidos independente**

É possível conectar uma caldeira a combustíveis sólidos e um outro tipo de caldeira no mesmo sistema, uma vez que a caldeira a combustíveis sólidos atinja a temperatura de operação, a outra caldeira é desligada automaticamente. Se a combustão diminui, a outra caldeira é activada, e se a demanda de calor for grande, as duas caldeiras podem funcionar em paralelo.

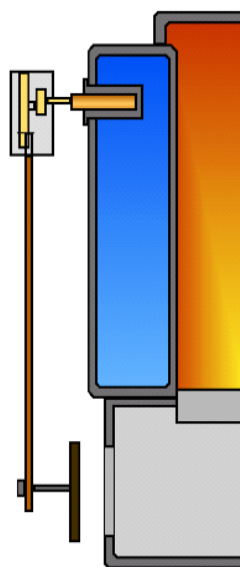
Este tipo de instalações devem ser cuidadosamente analisadas para evitar que uma caldeira não esteja a aquecer a outra e para que a expansão da água e o excesso de calor sejam geridos em segurança.



**Esquema 2.1 - Sistema de aquecimento central que integra caldeira a combustíveis sólidos e outro tipo de caldeira**

Algumas caldeiras a combustíveis sólidos possuem sistemas automáticos de realimentação, possuindo sistemas electrónicos de alimentação ou ventiladores que regulam a entrada de ar. Porém a maioria possui termóstatos mecânicos com uma bobine na qual existe um óleo que ao expandir, move um braço que fecha o fornecimento de ar levando a uma diminuição da combustão.

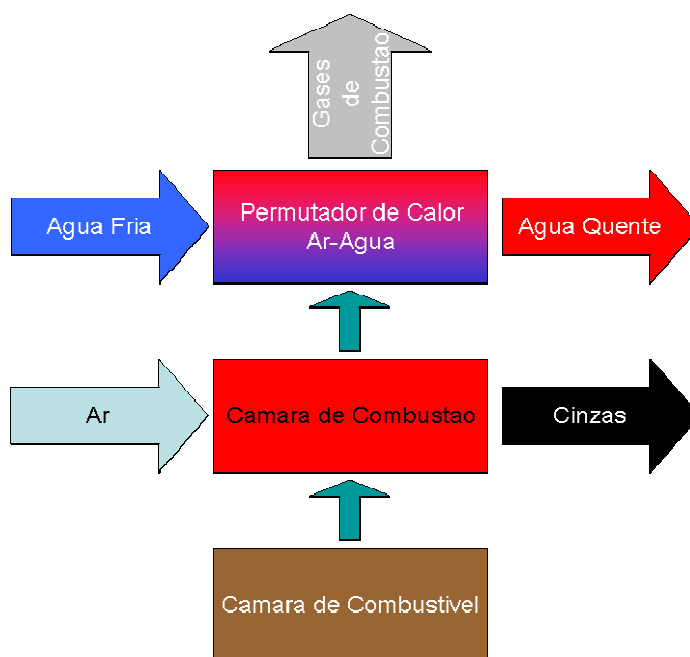
Portanto, se o relógio ou o termóstato da divisão do edifício determinar que não é necessário calor, a bomba de circulação para fazendo com que a temperatura da caldeira suba, o óleo expande, a entrada de ar fecha e a combustão pára. Se existir demanda de calor, água fria entra na caldeira, a entrada de ar abre e as brasas entram novamente em combustão.



**Esquema 2.2 - Sistema de controlo de temperatura**

## 2.3 Caldeiras a Combustíveis Sólidos

Uma caldeira a combustível sólidos é constituída por câmara de combustível, câmara de combustão, câmara de recolha de cinzas, permutador de calor ar-água, alimentação de ar e saída dos produtos de combustão. A forma como estes diferentes componentes estão organizados depende do tipo de combustão em que a caldeira se baseia assim como a relação preço final/combustível pretendida.

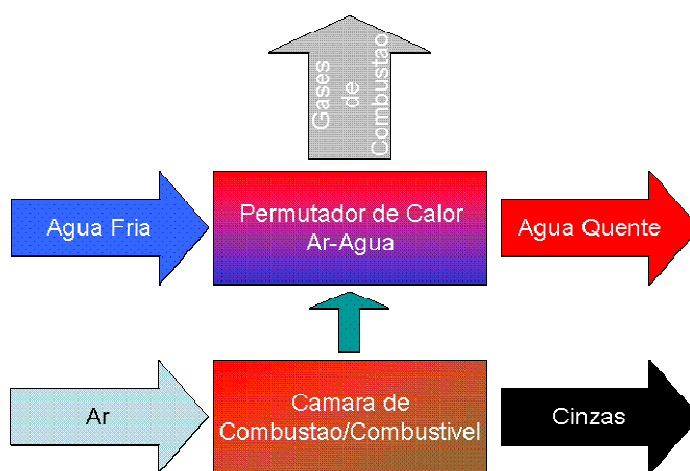


Esquema 2.3 - Organização de uma caldeira genérica

### 2.3.1 Caldeira Normal

Numa caldeira normal, visto que a pirólise e a combustão se dão simultaneamente, a câmara de combustível e a câmara de combustão, constituem o mesmo órgão na caldeira.

Neste tipo de combustão, visto que a mistura do ar com o combustível ocorre no interior do leito de combustível, torna-se mais difícil otimizar a mistura de ar e combustível, a combustão não é tão eficiente, o excesso de ar reduz a temperatura dos gases de combustão, fazendo com que a eficiência final da caldeira seja menor quando comparada com uma caldeira de gaseificação.



Esquema 2.4 - Organização de uma caldeira normal

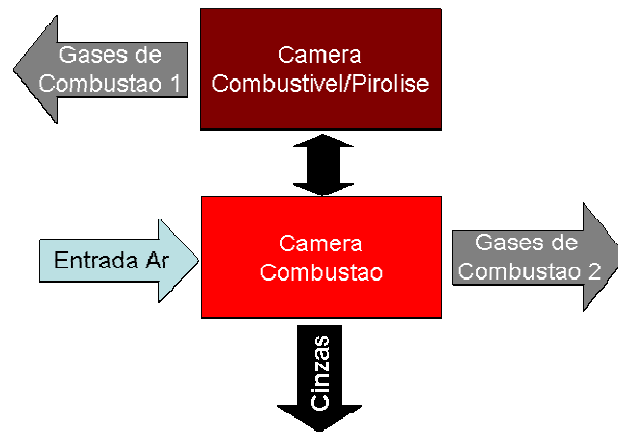
### 2.3.2 Caldeira de Gaseificação

Numa caldeira a combustão pirolítica ou de gaseificação, visto que a pirólise e a combustão dos seus produtos ocorre em dois eventos distintos, existem duas câmaras independentes - câmara de combustão e câmara de combustível. Neste tipo de caldeiras, a pirólise dá-se na câmara de combustível, os seus produtos são conduzidos por ventilação forçada para a câmara de combustão, onde vão ser misturados com ar, existindo a temperatura necessária a combustão espontânea, dá-se a combustão. Visto que a combustão ocorre numa câmara independente, torna-se mais fácil efectuar a mistura ar/combustível, levando a uma combustão mais eficiente, com menos excesso de ar que conduz a uma maior temperatura dos gases de combustão, aumentando a eficiência do sistema.

Numa caldeira de gaseificação, a operação divide-se em duas etapas. Uma primeira etapa em que se arranca a caldeira e uma segunda fase que constitui o modo de operação final da caldeira.

A primeira fase decorre do facto de ser necessário criar um leito de brasas que vai fornecer o calor necessário à pirólise. Durante esta fase, a saída dos Gases de Combustão 2 encontra-se aberta e a saída dos Gases de Combustão 1 é fechada (Esquema 2.5). O ar entra pelo injector, segue pelo canal que liga a câmara de combustão à de combustível/pirólise, onde se dá a pirólise imediatamente seguida da combustão.

Após cerca de 10-15 min, a saída de Gases de Combustão 1 é encerrada e aberta a saída dos Gases de Combustão 2, os produtos da pirólise são transportados para a câmara de combustão, onde são misturados com ar, dá-se a combustão, sendo que os gases de combustão saem pela saída Gases de Combustão 2.



Esquema 2.5 - Arranque da combustão numa caldeira de gaseificação

## 2.4 Gamas a Testar

As caldeiras a combustíveis sólidos são vendidas sob 3 gamas:

- DOR – gama baixa.
- FB - gama média.
- PYRO - gama alta.

De todas as gamas, a gama PYRO é considerada a gama mais alta. Porém, em operação real, os problemas derivados da sua alta temperatura de combustão, provocam problemas de corrosão e erosão, fazendo com que a sua durabilidade seja mais reduzida do que o esperado. Por isso, a gama FB é actualmente considerada a que tem melhores caldeiras.

As características das caldeiras - consumo, potência, temperatura, peso, atravancamento - são de extrema importância porque vão condicionar a concepção das bancas de teste e dos procedimentos.

As gamas que serão em seguida apresentadas apresentam a designação dos produtos comercializados sob a marca DAKON. As suas designações poderão ser diferentes quando comercializadas sobre as marcas Bosch e Buderus, porém, com excepção de pormenores estéticos, a concepção da caldeira é igual em qualquer uma das marcas.

### 2.4.1 Gama DOR

A gama DOR é a gama mais baixa das caldeiras a combustíveis sólidos. Apresenta potências nominais entre 13,5kW e 45kW, eficiência entre 74% e 82%, alimentação manual, controlo de temperatura manual e exaustão passiva.

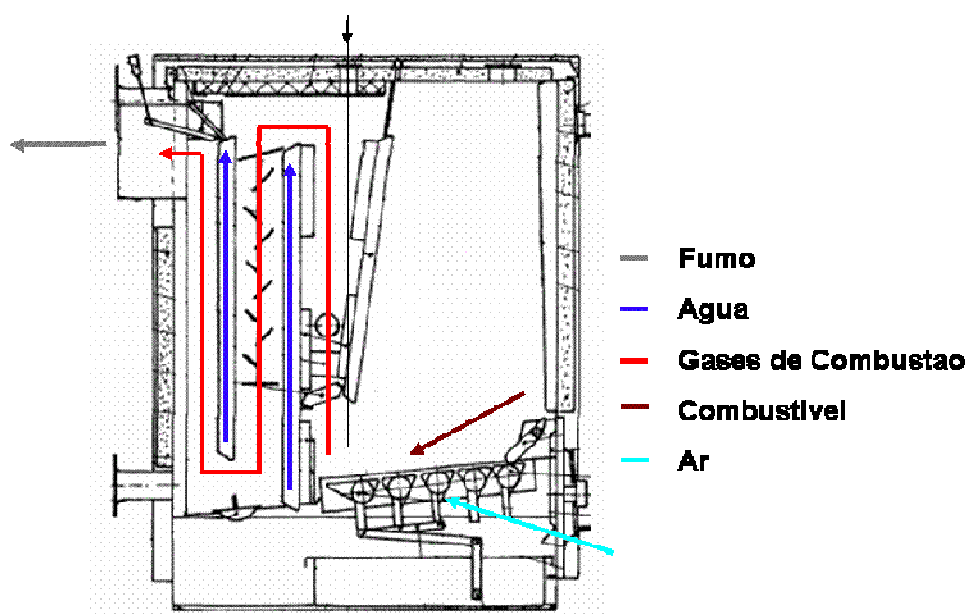
Características	Modelo	12	16	20	24	25	32	32D	45D
Potência (valor mínimo/valor nominal)	kW	7/13,5	6/16	6/20	7/24	8/27	9/32	9/28	12/45
Rendimento com combustível recomendado	%	78/84	74/78					75/82	76/82
Rendimento com combustível alternativo	%	74/86	72/83					73/82	
Classe segundo EN 303-5-2	-	Classe 2							
Combustível recomendado	-	Lenhite						Madeira	
Consumo	kg/h	3,2	4,7	6,0	7,6	7,9	8,9	8,4	14,0
Combustível Alternativo	-	A, B, C, D, E, F						B, C, D, E, F	
Volume da câmara de combustível	L	26		46		61		62	115
Volume de água no permutador	L	46	46	56	57	63	64	64	73
Temperatura de saída da água	°C	65 a 95							
Temperatura dos fumos	°C	100 a 250							
Débito mássico de fumos									
À potência nominal	g/s	15,2	17,8	22,3	26,5	30,4	36,1	19,6	31,5
À potência mínima	g/s	7,8	6,6	6,7	7,8	8,6	11,3	6,2	12,2
Tiragem necessária	Pa	12	18	20	26	26	26	26	26
Pressão máxima de serviço	bar	2,5							
Peso	kg	158	166	200	215	232	240		320
Dimensões	mm	600x730x920		770x700x1040		870x700x1060			980x770x1045

**A - Madeira; B - Lenhite (10-20mm); C - Briquettes; D - Combustíveis comprimidos; E - Carvão; F - Coque**

**Tabela 2.5 - Características das caldeira da gama DOR**

Nas caldeiras da gama DOR, a combustão ocorre imediatamente após a pirólise do combustível sólido portanto a câmara de combustível é a mesma que a câmara de combustão.

Em seguida, pode-se ver o esquema da caldeira.



**Esquema 2.6 - Funcionamento de uma caldeira da gama DOR**

O combustível existente na câmara de combustão vai-se misturar com o ar proveniente do exterior, ocorrendo a combustão nessa mesma câmara. Em seguida, os gases de combustão são condicionados por ventilação natural, a seguir o percurso definido pelo permutador de calor. A água existente nesse permutador, por convecção, radiação e condução vai extrair calor dos gases de combustão, sofrendo um acréscimo de temperatura de cerca de 20°C. Os gases de combustão irão finalmente ser expulsos através do sistema de ventilação natural.



## **2.4.2 Gama FB**

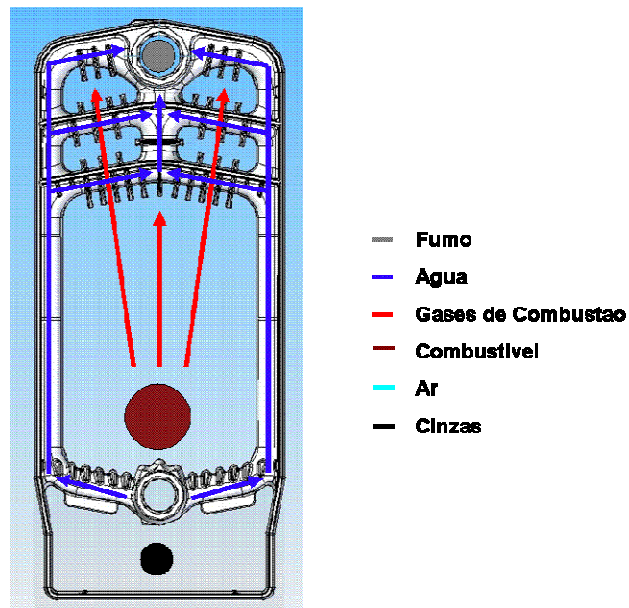
A gama FB é a gama média das caldeiras a combustíveis sólidos. Apresenta potências nominais entre 20kW e 42kW, eficiência entre 78% e 82%, alimentação manual, controlo de temperatura manual e exaustão passiva.

Característica	Modelo	20	20D	26	26D	32	32D	36	36D	42	42D
Potência (valor mínimo/valor nominal)	kW	6/20	8/16	8/26	10/20	9,5/32	13/25	11/36	15/30	12,5/42	17/34
Rendimento com combustível recomendado	%	78 a 82									
Combustível recomendado	-	Coque	Madeira	Coque	Madeira	Coque	Madeira	Coque	Madeira	Coque	Madeira
Consumo	kg/h	3,37	4,85	4,8	6,11	5,9	7,38	6,66	8,65	7,77	9,92
Volume da câmara de combustível	l	25,5		34		42,5		51		59,5	
Volume de água no permutador	l	27		31		35		39		43	
Temperatura de saída da água	°C	50 a 90									
Temperatura dos fumos	°C	120/240		130/250		140/250		150/260			
Débito massivo de fumos											
À potência nominal	g/s	9,54		12,31		15,08		16,99		19,78	
À potência mínima	g/s	3,02		3,95		4,66		5,36		6,04	
Tiragem necessária	Pa	20		22		23		25		28	
Pressão máxima de serviço	bar	4									
Peso	kg	210		245		280		315		350	
Dimensões	mm	1033x1344x840		1033x1344x940		1033x1344x1040		1033x1344x1140		1033x1344x1240	

**Tabela 2.6 - Características das caldeiras da gama FB**

Nas caldeiras da gama FB, a combustão ocorre imediatamente após a pirólise do combustível sólido portanto a câmara de combustível é a mesma que a câmara de combustão.

Em seguida, pode-se ver o esquema da caldeira.



**Esquema 2.7 - Funcionamento de uma caldeira da gama FB**

### **2.4.3 Gama PYRO**

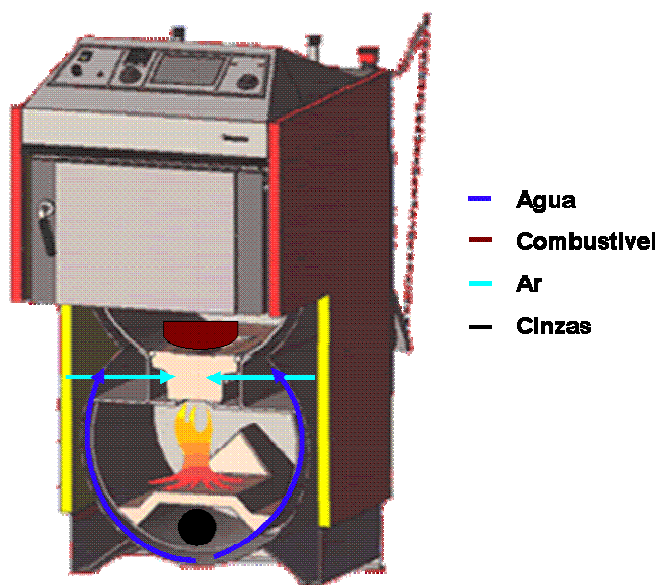
A gama PYRO é a gama alta das caldeiras a combustíveis sólidos. Apresenta potências nominais entre 21kW e 36kW, eficiência entre 78% e 85%, alimentação manual, controlo de temperatura automático e exaustão activa.

<b>Característica</b>	<b>Modelo</b>	<b>18</b>	<b>24</b>	<b>32</b>	<b>38</b>
Potência (valor mínimo/valor nominal)	kW	8/21	12/35	13/33	15/36
Rendimento com combustível recomendado	%	78 a 85			
Combustível recomendado	-	Madeira			
Consumo	kg/h	5,7	7	8,5	10
Volume da câmara de combustível	l	66	86	114	138
Volume de água no permutador	l	76	90	107	124
Temperatura de saída da água	°C	65 a 95			
Temperatura dos fumos	°C	100 a 200			
Débito massivo de fumos à potência nominal	g/s	15,2	18,0	21,0	24,0
Pressão máxima de serviço	bar	3,0			
Peso	kg	310	350	375	410
Dimensões	mm	750x626x1185	850x626x1185	800x686x1250	900x686x1250

**Tabela 2.7 - Características das caldeiras da gama PYRO**

Nas caldeiras da gama PYRO, a pirólise e a combustão dos seus produtos dão-se em eventos separados, pelo que a câmara de combustível e a câmara de combustão constituem duas unidades independentes. Visto que é necessário transportar os produtos da pirólise da câmara de combustível para a câmara de combustão, a caldeira vem equipada com um sistema de ventilação forçada. A temperatura máxima alcançada na câmara de combustão é de 1500 °C.

Em seguida, pode-se ver o esquema da caldeira.



**Esquema 2.8 - Funcionamento de uma caldeira da gama PYRO**

A água do sistema de aquecimento central circula pela concha em redor da câmara de combustível e da câmara de combustão.

### 3 Teste de Eficiência e Emissões

No mercado europeu, para que a caldeira seja aprovada é necessário que se cumpram os requisitos da norma EN303-5. Esta norma classifica o tipo de caldeira, a concepção, os materiais, os testes de resistência e de eficiência, e a documentação que deve acompanhar a caldeira na sua comercialização final.

Devido a contratempos relacionados com a incapacidade dos fornecedores da bomba e dos permutadores e da empresa de instalação em cumprir os prazos não foi possível montar e testar a banca de testes. Porém toda a informação referente à banca de teste, instruções de montagem e utilização foram devidamente documentadas e arquivadas para que, num futuro próximo, seja fácil a implementação da banca desenvolvida.

#### 3.1 Teste de Eficiência

No teste de eficiência, a temperatura de entrada da água quente deverá ser 60°C e a temperatura da água de saída deverá rondar os 80°C.

O teste de eficiência pode ser feito de duas formas diferentes, uma directa e outra indirecta.

##### 3.1.1 Método Directo

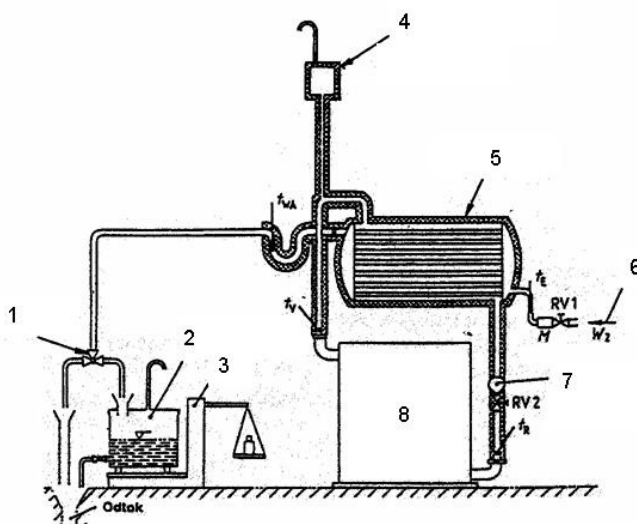
No método directo, a eficiência é obtida através da razão entre o calor obtido e o calor contido no combustível.

$$\eta = Q/Q_B$$

Q - calor extraído da caldeira,  $Q_B$  - poder calorífico da amostra de combustível testada

Este método é relativamente simples de reproduzir, sendo apenas necessário recolher os dados sobre a massa de combustível inserida na caldeira, as temperaturas de entrada e saída de água e o caudal de água.

Segundo a norma “ČSN EN 304 - Kotle pro ústředni vytápění. Předpisy pro zkoušení kotlu pro ústředni vytápění s rozprašovacími hořáky na kapalná paliva” (Caldeiras para aquecimento – Regras de ensaio de caldeiras para aquecimento com queimadores a óleo pulverizado), as bancas de teste podem ter dois tipos de princípio de funcionamento, circuito aberto (Esquema 3.2) e circuito fechado (Esquema 3.1) como pode ser observado nos esquemas seguintes.



1 - Válvula de 3 vias

2 - Contentor da Balança

3 - Balança

4 - Vaso de Expansão fechado ou aberto

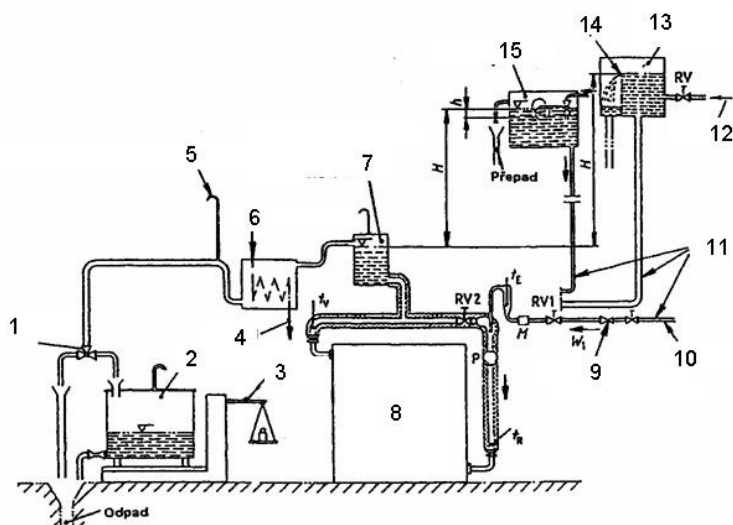
5 - Permutador de calor

6 - Entrada de água fria a pressão constante

7 - Bomba de circulação

8 - Caldeira

Esquema 3.1 - Instalação de uma banca de eficiência em circuito fechado



1 - Válvula de 3 vias

2 - Contentor da Balança

3 - Balança

4 - Saída de água quente

5 - Respiradouro

6 - Entrada de água fria

7 - Tanque de regulação de caudal  
aberto ou fechado

8 - Caldeira

9 - Válvula redutora de pressão

10 - Entrada de água fria

11 - Várias opções de abastecimento

12 - Entrada de água fria

13 - Tanque de abastecimento de  
água constante

14 - Escape da água em excesso

15 - Reservatório com flutuador

Esquema 3.2 - Instalação de uma banca de eficiência em circuito aberto

### 3.1.1.1 Cálculo do Calor Extraído – Circuito Aberto

$$Q_N = W_1 \cdot C_{W1} \cdot (T_W - T_E)$$

Onde  $W_1$  é o caudal que entra ou sai da instalação

$C_{W1}$  é o calor específico mássico da água à temperatura de  $(T_R - T_E)/2$

$T_R$  é a temperatura de entrada da água da caldeira

$T_E$  é a temperatura de entrada da água na instalação

$T_W$  é a temperatura de saída da água da instalação

### 3.1.1.2 Cálculo do Calor Extraído – Circuito Fechado

$$Q_N = W_2 \cdot C_{W2} \cdot (T_{WA} - T_E) + Q_V$$

Onde  $W_2$  é o caudal de água de arrefecimento

$T_E$  é a temperatura de entrada da água de arrefecimento

$T_{WA}$  é a temperatura de entrada da água de arrefecimento

$C_{W2}$  é o calor específico mássico da água à temperatura de  $(T_{WA} + T_E)/2$

$Q_V$  é a perda de calor da instalação considerando que os testes são realizados a uma temperatura  $W$

### 3.1.1.3 Cálculo do Calor Fornecido - $Q_B$

$$Q = B \cdot H_u$$

Onde  $B$  é o caudal mássico de combustível

$H_u$  é o poder calorífico do combustível

### 3.1.2 Método Indirecto

O método indirecto é só utilizado para verificação dos resultados, contempla as perdas que ocorrem por combustão incompleta, radiação, convecção e condução e calor sensível dos produtos de combustão.

$$\eta = 1 - (Q_a - Q_u - Q_s - Q_b) / Q_B$$

$Q_a$  - calor sensível dos produtos de combustão

$Q_u$  - perdas por combustão incompleta

$Q_s$  - perdas por radiação, condução e convecção

$Q_b$  - perdas por combustível não queimado na câmara de combustão

$Q_B$  – energia química da amostra de combustível testada

Este método é mais complexo pelo que não é muito utilizado, o cálculo dos valores anteriormente mencionados não é directo exigindo medições das emissões, análise química das cinzas e análise térmica da caldeira.

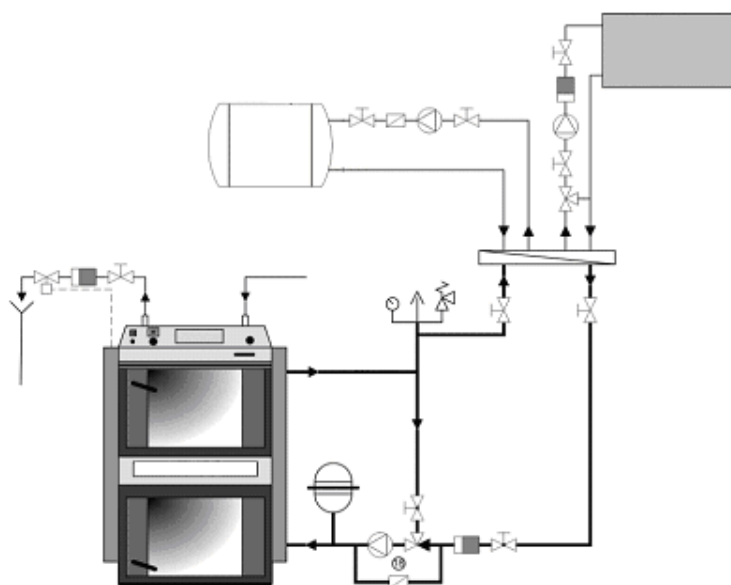
Poderá pensar-se que teria interesse fazer a análise detalhada que este método propõe. Porém, em termotecnologia, em caldeiras de potências reduzidas, é mais simples, menos oneroso e mais rápido, criar um protótipo e testa-lo do que fazer uma análise detalhada do sistema.



### 3.2 Banca de Teste de Eficiência em Ciclo Fechado

O desenvolvimento de uma nova banca de teste em ciclo fechado irá permitir realizar, não só os testes de eficiência necessários à homologação do produto, mas também simular o funcionamento da caldeira em operação real. Normalmente, um sistema de aquecimento central opera em circuito fechado possuindo uma válvula de 3vias que condiciona a água de acordo com a sua temperatura.

Em seguida, é apresentada uma possível instalação de uma caldeira para aquecimento central e aquecimento de águas quentes sanitárias.



**Esquema 3.3 - Instalação de aquecimento central com uma caldeira a combustíveis sólidos**

Como se pode verificar, numa instalação real, existem 3 circuitos fechados, o circuito da caldeira, o do aquecimento central e o das águas quentes sanitárias.

No circuito da caldeira, enquanto a água não alcançar a temperatura desejada, a válvula condiciona o fluido a regressar à caldeira. Assim que o fluido alcançar a temperatura desejada, este é orientado para o permutador.

No circuito do aquecimento central, a bomba só é iniciada quando a temperatura à saída da caldeira atinge os 80°C.

No circuito da caldeira, a bomba é accionada quando a temperatura a saída da caldeira é de 80°C e a temperatura do depósito é inferior a 60°C.

Evidentemente que na banca na ser desenvolvida não existirão os circuitos do aquecimento central nem os circuitos das águas quentes sanitárias (AQS). Em seu lugar, serão colocados um conjunto de permutadores água/água que permitirão simular a carga térmica desejada.

### 3.2.1 Requisitos

A banca deverá cumprir um conjunto de requisitos que garantam que irá ter um funcionamento correcto. Os requisitos serão:

1. Temperatura de operação - 5°C e 120°C
  - a. Tendo influência sobre
    - i. O dimensionamento das tubagens;
    - ii. A selecção de materiais;
    - iii. A selecção da instrumentação;
    - iv. O dimensionamento dos vasos de expansão;
    - v. O dimensionamento das válvulas de segurança;
2. Pressão máxima de trabalho – 2,5bar (rel.)
  - a. Tendo influência sobre
    - i. O dimensionamento das tubagens;
    - ii. A selecção das válvulas de segurança;
    - iii. A selecção do vaso de expansão;
    - iv. Os restantes componentes terão que suportar a pressão de operação;
3. Caudal volúmico - 0,9 a 4,5 m<sup>3</sup>/h
  - a. Tendo influência sobre
    - i. A selecção da instrumentação;
    - ii. O dimensionamento das tubagens;
    - iii. A selecção da bomba;
4. Potência - 20 a 100 kW
  - a. Tendo influência sobre
    - i. O dimensionamento dos permutadores;
    - ii. A válvula de segurança;
5. Incremento de temperatura da água - 20°C
  - a. Tendo influência sobre
    - i. A selecção dos permutadores.

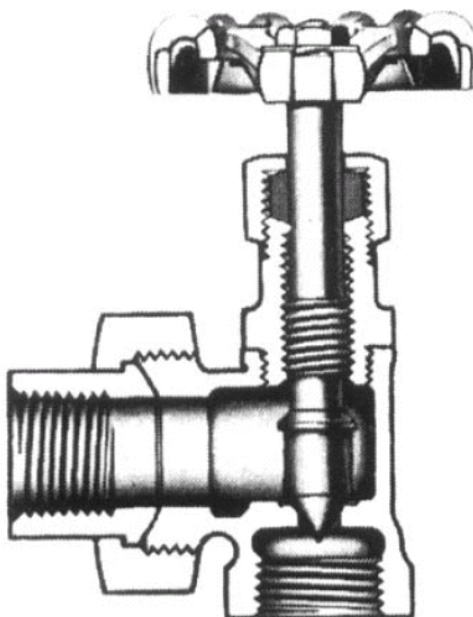
### 3.2.2 Concepção

#### 3.2.2.1 Selecção de Válvulas

As válvulas são uma parte essencial de qualquer sistema de tubagem que transporte líquidos, gases, vapores, misturas de líquidos e gases.

Os diferentes tipos de válvulas são de gaveta, globo, anti-retorno, macho esférico, *plug*, borboleta, diafragma, *pinch* e de segurança. Cada um destes tipos possui várias categorias e concepções, cada um oferecendo diferentes recursos e funcionalidades. Algumas destas válvulas são autónomas, outras são actuadas manualmente ou possuem actuadores que são alimentados electricamente, pneumaticamente ou hidraulicamente. Podem ser fabricadas com materiais metálicos ou não metálicos.

Para seleccionar uma válvula para uma aplicação específica, o utilizador tem que avaliar as características da válvula, incluindo a concepção, materiais de construção e performance, em linha com os requisitos específicos da aplicação: fluido de trabalho, requisitos de concepção do processo, concepção das tubagens e factores económicos.



Esquema 3.4 - Exemplar de válvula (Zappe, 2009)

Em anexo são descritos sucintamente os tipos de válvulas que se aplicam nas instalações experimentais em análise.

Na instalação, serão necessários de dois tipos de válvula. Um tipo que nos confira um bom controlo de caudal e uma boa resistência térmica para regular o caudal dos circuitos e um tipo de válvula que nos confira uma boa vedação, uma abertura/fecho rápida e uma boa resistência térmica.

Tendo em conta as características dos diferentes tipos de válvulas, foi considerada o tipo de válvula ideal para controlo de caudal a válvula globo pela sua boa resistência mecânica e térmica e bom controlo de caudal. Para os pontos de ligação a rede, foi seleccionada a válvula de macho esférico, pela sua boa resistência mecânica e capacidade de vedação, simplicidade e baixo preço.

### **3.2.3 Selecção de Tubagem**

A selecção da tubagem leva em conta a resistência à corrosão, a resistência mecânica e a adequação da velocidade da água ao sistema em causa. A velocidade da água de acordo com o tipo de serviço é (ASHRAE, 2001):

- Serviço em geral - 0,36 a 0,92 m/s;
- Rede de abastecimento de água - 0,27 a 0,64 m/s;
- Alimentação de caldeiras - 0,55 a 1,40 m/s;
- Bombas de sucção e linhas de purga - 0,36 a 0,64.

A velocidade máxima de escoamento para que se minimize a erosão é:

- 1500 horas de operação anual - 4,6m/s;
- 2000 horas de operação anual - 4,4m/s;
- 3000 horas de operação anual - 4,0m/s;
- 4000 horas de operação anual - 3,7m/s;
- 6000 horas de operação anual - 3,0m/s.

Em termos de resistência mecânica e rigidez estrutural, os valores recomendados para a distância máxima entre dois suportes de tubagem estão presentes na tabela seguinte.

Tamanho Nominal NPS	(DN)	ANSI/ASME B36.10 Tubos de Aço Designação	Distância entre apoios das tubagens			
			Sem Isol.	1-in Isol.	1½-in Isol.	2-in Isol.
½	(15)	40	2,03	1,63	1,37	1,19
		80	2,01	1,65	1,40	1,22
		160	1,93	1,65	1,45	1,27
¾	(20)	40	2,26	1,91	1,68	1,47
		80	2,26	1,93	1,73	1,55
		160	2,21	1,93	1,75	1,57
1	(25)	40	2,51	2,13	1,93	1,75
		80	2,51	2,21	2,03	1,85
		160	2,46	2,21	2,06	1,88

**Tabela 3.1 - Distância entre apoios para diferentes tamanhos de tubagens e espessuras de isolamento  
(Nayyar, 2000)**

A gama de temperaturas em que a tubagem opera não oferece problemas nem quanto a fluência nem quanto a fragilidade do material a baixas temperaturas.

As ligações das tubagens serão rosqueadas pois permitem uma montagem mais rápida, uma maior flexibilidade e um custo final menor que as ligações flangeadas ou soldadas.

A selecção do diâmetro da tubagem terá de ter em conta as perdas de carga aceitáveis para o sistema. Visto que o sistema opera em caudais entre 0,9 e 4,5 m<sup>3</sup>/h., isto originará perdas de carga no sistema bastante diferentes, consoante os caudais de operação. Assim, foi seleccionado o diâmetro de 1" porque diminui as perdas ao caudal máximo, diminuindo a diferença de perdas entre o caudal máximo e mínimo, facilitando deste modo a selecção da bomba e o controlo do caudal.

### 3.2.4 Isolamento

As espessuras de isolamento de poliuretano expandido recomendada, considerando a emissividade da superfície de 0,4, a velocidade do vento média de 8 km/h, uma temperatura ambiente de 32°C e temperatura da superfície do isolamento de 60°C, vem dada da tabela seguinte em função do diâmetro nominal da tubagem e da temperatura média do fluido a escoar no interior da tubagem:

Temperatura (°C)	Diâmetro nominal (DN)													
	15	25	40	50	80	100	150	200	250	300	400	450	600	Liso
	Espessura do Poliuretano (mm)													
75	25	25	25	25	25	25	25	38	38	38	38	38	38	38
100	25	25	25	25	25	25	25	38	38	38	38	38	38	38
150	25	25	25	25	25	25	25	38	38	38	38	38	38	38

**Tabela 3.2 - Espessura de isolamento para diferentes tipos de tubagens e temperaturas de operação  
(Nayyar, 2000)**

Visto que a tubagem seleccionada tem 1" de diâmetro e o sistema operará em regime contínuo a temperaturas entre 60 e 80°C, a espessura do isolamento será de 25mm.

### 3.2.5 Permutador de Calor

O permutador de calor deverá suportar potências entre os 20 kW e os 100kW.

Existem dois tipos principais de permutadores de calor que são utilizados neste tipo de instalações, permutadores água/ar e permutadores água/água.

Os permutadores água/ar tem o benefício de não desperdiçarem água e de, um só modelo, cobrir uma gama de potências muito alargada, através da activação dos diversos ventiladores podendo vir acompanhados por um sistema de controlo de temperatura. As suas desvantagens são o facto de consumirem energia eléctrica, terem um elevado atravancamento e o ruído produzido.



**Figura 3.1 - Exemplar de permutador água-ar (Alfa Laval, 2004)**

Os permutadores água/água têm a grande desvantagem de consumir água e terem uma gama de potências de operação mais reduzida. Não possuem sistemas de controlo automático, é possível instalar uma válvula de regulação automática de caudal porém é um sistema comprado à parte e é necessário definir o seu controlo.

As grandes vantagens são o facto de serem bastante compactos, terem alta eficiência e serem de fácil instalação.



**Figura 3.2 - Exemplares de permutadores água-água (Alfa Laval, 2004)**

O tipo de permutador seleccionado foi o permutador do tipo água/água visto que existem limitações de espaço na banca de ensaios e o consumo de água não ser problema do ponto de vista da empresa.

Na selecção de um permutador de calor, o projectista tem de garantir que:

- o permutador garante a potência máxima admissível no sistema;
- o escoamento no bocal do permutador é turbulento.

O fornecedor escolhido foi a Alfa Laval, visto que se trata de uma empresa com historial de colaboração com a Bosch Termotechnika s.r.o. tendo os seus produtos uma boa reputação.

O permutador água/água seleccionado foi o modelo CB27-34M. Este modelo tem uma potência térmica de permuta de 100 kW.

As características do permutador estão sintetizadas na seguinte tabela.

Característica	CB27-34M
Temperatura de operação [°C]	225/-160
Pressão máxima de utilização [bar]	30/30
Volume [l]	0,059
Caudal Máximo [m <sup>3</sup> /h]	12,7/7,5
Perda de Carga [kPa]	11,1
Ligações - rosca externa [in]	1 1/4" / 1"

**Tabela 3.3 - Características do Permutador Alfa Laval CB27-34M**



Para o caudal máximo caudal de  $4,5\text{m}^3/\text{h}$ , o escoamento tem as seguintes características:

- Do lado da água quente
  - Diâmetro da ligação - 30mm
  - $\text{Re}=1,9 \times 10^4$  - escoamento turbulento
- Do lado da água fria
  - Diâmetro de ligação - 23mm
  - $\text{Re}=2,5 \times 10^4$  - escoamento turbulento

Para o caudal mínimo de  $0,9\text{ m}^3/\text{h}$ , o escoamento tem as seguintes características:

- Do lado da água quente
  - Diâmetro da ligação - 30mm
  - $\text{Re}=3,4 \times 10^3$  - escoamento na zona de transição.
- Do lado da água fria
  - Diâmetro de ligação - 23xmm
  - $\text{Re}=4,5 \times 10^5$  - escoamento turbulento

Como se pode verificar, o escoamento para  $0,9\text{ m}^3/\text{h}$ , não é totalmente turbulento. Este facto irá diminuir a capacidade do sistema transferir calor. Torna-se necessário seleccionar um permutador que consiga colmatar a gama de potências que o modelo CB27-34M não cobre.

A banca possuirá dois permutadores: um que cubra as baixas potências e outro que cubra as altas potências de arrefecimento.

Foi seleccionado o modelo CB14-14M de 20kW cujas características estão sintetizadas na tabela seguinte.

Característica	CB14-14M
Temperatura de operação [°C]	225/-160
Pressão máxima de utilização [bar]	30/30
Volume [l]	0,028
Caudal Máximo [m <sup>3</sup> /h]	3,6
Perda de Carga [kPa]	13,4
Ligações - rosca externa [in]	¾"

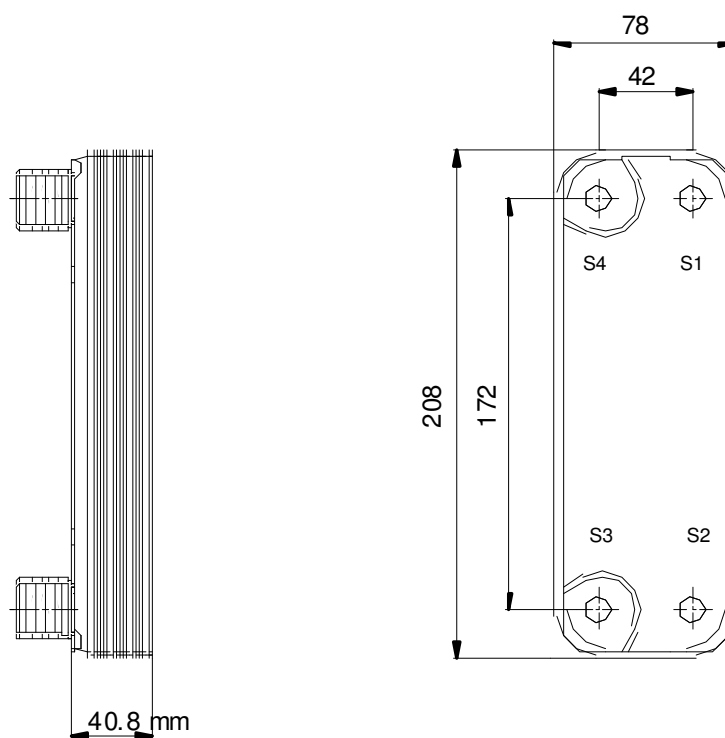
**Tabela 3.4 - Características do permutador Alfa Laval CB-14M**

Para o caudal mínimo de  $0,9 \text{ m}^3/\text{h}$ , o escoamento tem as seguintes características:

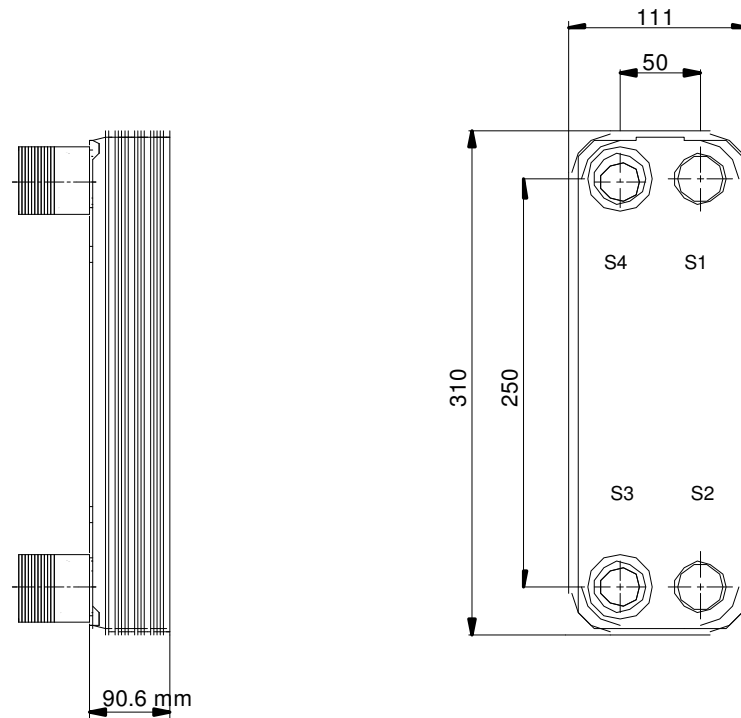
- Do lado da água quente
  - Diâmetro da ligação - 16mm
  - $Re=6,4 \times 10^3$  - escoamento turbulento
- Do lado da água fria
  - Diâmetro de ligação - 12mm
  - $Re=8,6 \times 10^3$  - escoamento turbulento

Deste modo, consegue-se cobrir todas as gamas de potências do sistema.

Em seguida, são apresentados os esquemas dos permutadores seleccionados.



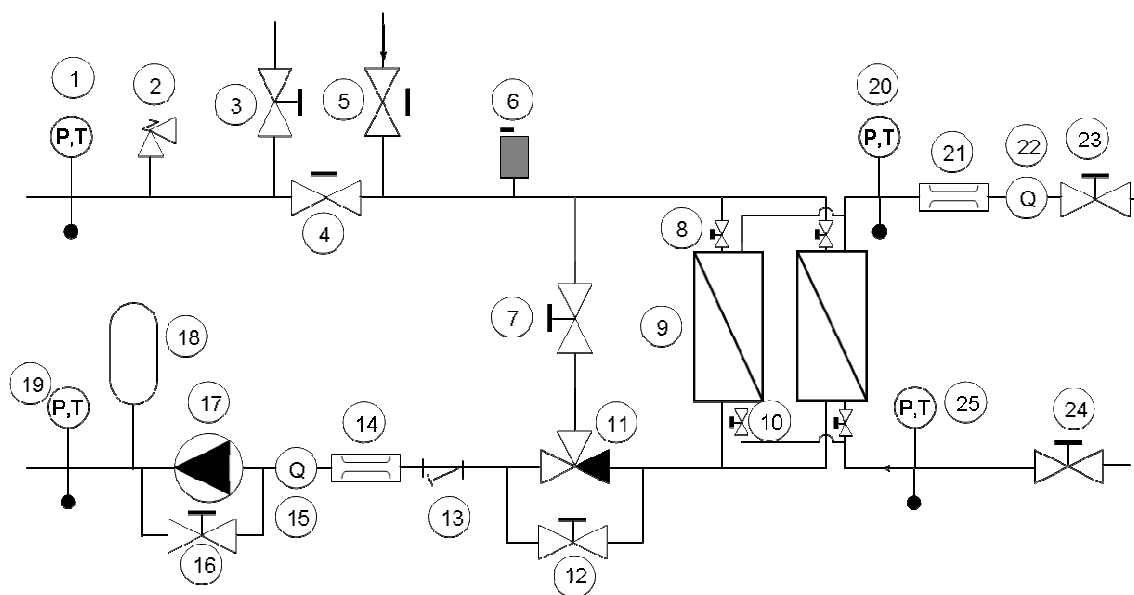
**Esquema 3.5 - Permutador Alfa Laval CB14-14H**



**Esquema 3.6 - Permutador Alfa Laval CB27-34M**

O tamanho dos permutadores irá influenciar a concepção da banca. Os permutadores podem ser colocados em qualquer posição desde que as ligações se encontrem num plano vertical. Deste modo, garante-se que o sistema pode ser purgado.

### 3.3 Esquema da Instalação



- |                                     |                             |                                      |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1 - Sensor de temperatura e pressão | 10 - Válvula macho esférico | 19 - Sensor de temperatura e pressão |
| 2 - Válvula de segurança            | 11 - Válvula termostática   | 20 - Sensor de temperatura e pressão |
| 3 - Válvula macho esférico          | 12 - Válvula macho esférico | 21 - Caudalímetro                    |
| 4 - Válvula globo                   | 13 - Filtro                 | 22 - Caudalímetro                    |
| 5 - Válvula macho esférico          | 14 - Caudalímetro           | 23 - Válvula macho esférico          |
| 6 - Purga de ar                     | 15 - Caudalímetro           | 24 - Válvula globo                   |
| 7 - Válvula globo                   | 16 - Válvula macho esférico | 25 - Sensor de temperatura e pressão |
| 8 - Válvula macho esférico          | 17 - Bomba                  |                                      |
| 9 - Permutador                      | 18 - Vaso de expansão       |                                      |

Esquema 3.7 - Banca de teste de eficiência em circuito fechado

### **3.3.1 Função dos Componentes**

#### ***Componente 1 - Sensor de temperatura e pressão***

O componente seleccionado foi um manómetro analógico que mede temperatura entre 0 e 120°C e pressões entre 0 e 6bar (rel.) e um sensor de temperatura PT500.

A escolha de um manómetro analógico tem como objectivo possibilitar a observação imediata por parte do operador da pressão e da temperatura do sistema. Permite também a verificação do bom funcionamento do sensor de temperatura por resistência.

#### ***Componente 2 - Válvula de segurança***

A válvula de segurança encontra-se imediatamente a seguir à caldeira porque se pretende proteger a caldeira de sobrepressões. Assim, se a pressão na caldeira atingir os 6bar (rel.), a válvula será activada. A caldeira é o elemento mais crítico em termos de segurança porque, em caso de dano, poderá provocar prejuízos humanos e materiais graves.

#### ***Componente 3 - Válvula de macho esférico***

Esta válvula permite a saída de água do sistema aquando da purga inicial do sistema. A selecção da válvula de macho esférico deve-se ao seu fecho rápido, a sua boa estanquicidade, ao baixo volume e ao seu reduzido preço.

#### ***Componente 4 - Válvula globo***

Esta válvula vai permitir o controlo de caudal da instalação. A válvula globo permite um bom controlo de caudal, possui uma boa resistência mecânica e térmica.

#### ***Componente 5 - Válvula de macho esférico***

Esta válvula permite a entrada de água no sistema aquando da purga inicial do sistema. A selecção da válvula de macho esférico deve-se ao seu fecho rápido, a sua boa estanquicidade, ao baixo volume e ao seu reduzido preço.

#### ***Componente 6 - Purga de ar***

A purga de ar é necessária para deixar sair o ar aquando da purga inicial do sistema e, à posteriori, para permitir a retirada de ar que entra no sistema através das ligações entre os diferentes componentes e das válvulas.

### ***Componente 7 - Válvula globo***

Esta válvula é responsável pela igualização das perdas nos dois ramos do circuito e por permitir, no caso de se pretender testar a caldeira nas condições definidas pela norma, fechar esse ramo, passando a água a circular somente no ramo Caldeira/Permutador.

### ***Componente 8 - Válvula macho esférico***

As duas válvulas macho esférico localizadas antes do permutador do lado do circuito aberto vão permitir a selecção do permutador a utilizar.

### ***Componente 9 - Permutador***

O permutador é o componente que irá simular o consumo de calor por parte da instalação.

### ***Componente 10 - Válvula macho esférico***

As duas válvulas macho esférico localizadas antes do permutador do lado do circuito fechado vão permitir a selecção do permutador a utilizar.

### ***Componente 11 - Válvula Termostática***

A válvula termostática vai permitir que a temperatura de retorno da caldeira seja sempre de 60°C. Enquanto a água na saída da caldeira não atingir os 60°C, a válvula condiciona o caudal de novo para a caldeira. Assim que esta temperatura for atingida, a válvula vai permitir que o fluido circule pelo permutador de calor.

Aplica-se esta válvula pois é o tipo de válvula utilizada nos sistemas de aquecimento central instalados nos edifícios. Relembra-se que o objectivo desta banca é permitir a simulação real de funcionamento.

### ***Componente 12 - Válvula globo***

Esta válvula permite que o fluido circule apenas pelo ramo Caldeira/Permutador. Abrindo esta válvula e encerrando a válvula componente 16 pode testar-se a caldeira nas condições especificadas pela norma. Este componente, também irá permitir que se efectue a purga total do sistema porque à temperatura ambiente a válvula termostática encontra-se fechada, impedindo a retirada do ar das tubagens e restantes componentes.

### ***Componente 13 - Filtro***

O filtro remove as suspensões sólidas que se possam encontrar no circuito. Encontra-se localizado antes da bomba e dos caudalímetros porque se tratam dos componentes mais sensíveis em termos de danos físicos.

### ***Componente 14 - Caudalímetro com turbina***

Este tipo de caudalímetro vai permitir a observação em tempo real do caudal que circula no sistema. Visto que o seu output é um sinal eléctrico, também será possível a recolha dos dados para que, à posteriori, seja calculada a eficiência do sistema.

### ***Componente 15 - Caudalímetro volumétrico***

O caudalímetro volumétrico vai permitir a medição do volume total de água que circulou no sistema durante o teste. Este tipo de caudalímetros é bastante resistente e fiável

### ***Componente 16 - Válvula globo***

Esta válvula vai permitir um melhor controlo do caudal do sistema. Ao efectuar um curto-circuito no sistema, fazemos com que a água escoe neste circuito, não indo para o sistema. Existe a necessidade deste artifício visto que a bomba utilizada tem uma altura manométrica a baixos caudais muito superior ao necessário, mesmo quando se utiliza o nível mais baixo de potência.

### ***Componente 17 - Bomba***

A bomba é o elemento que irá permitir a circulação de água no circuito fechado. Foi seleccionada uma bomba que permite 3 níveis diferentes de potência, de modo que a válvula que controla o caudal não tenha uma gama tão alta de perdas localizadas a cobrir.

### ***Componente 18 - Vaso de expansão***

O vaso de expansão vai permitir compensar o aumento do volume de água no sistema, derivado do seu aumento de temperatura, evitando o aumento de pressão do sistema que conduziria a activação da válvula de segurança.

### ***Componente 20 e 25 - Manómetro de temperatura e pressão***

Estes dois manómetros de temperatura e pressão têm como único objectivo o controlo visual do bom funcionamento da instalação.

### ***Componente 21 - Caudalímetro com turbina***

Este tipo de caudalímetro vai permitir a observação em tempo real do caudal que circula no sistema.

### ***Componente 22 - Caudalímetro volumétrico***

O caudalímetro volumétrico vai permitir a medição do volume total de água que circulou no sistema durante o teste. Este tipo de caudalímetros é bastante resistente e fiável. O caudalímetro volumétrico será utilizado para se determinar a quantidade total de água que circulou no sistema de arrefecimento.

### ***Componente 23 - Válvula macho esférico***

A válvula de macho esférico vai permitir o controlo grosso do caudal no circuito aberto.

### ***Componente 24 - Válvula globo***

Esta válvula concede um bom controlo de caudal permitindo regular o volume de água que circula no circuito aberto. Deste modo, controla-se a potência do permutador.



### **3.3.2 Cálculo das Perdas de Carga**

O cálculo das perdas de carga é importante não só para a selecção da bomba mas também no controlo do caudal do sistema.

Portanto, visto que os caudais em que o sistema vai funcionar são bastante diferentes, vai ser necessário calcular as perdas de cargas máxima e mínima do sistema.

O cálculo das perdas de carga será calculado considerando um tubo de aço inoxidável de 1'' de diâmetro.

Variável	Perda de Carga do Sistema	
	Mínima	Máxima
Caudal [m³/h]	0,9	4,5
Temperatura [°C]	80	60
$\rho$ [kg/m³]	971,8	983,2
Viscosidade Dinâmica [Pa.s]	$4,67 \times 10^{-4}$	$3,55 \times 10^{-4}$
Diâmetro [mm]	2,54	
Área [mm²]	$1,01 \times 10^{-3}$	
Velocidade [m/s]	0,27	1,37
N.º válvulas globo	1	
Coeficiente de perda localizada	5	
N.º válvulas macho esférico	2	
Coeficiente de perda localizada	5	
N.º de joelhos	8	
Coeficiente de perda localizada	2	
N.º de T	4	
Coeficiente de perda localizada	1,5	
Coeficiente de perdas localizadas totais - $K_T$	49,5	
Perdas localizadas totais [m c.a.] $\Delta p = 1/2 \rho V^2$	0,18	4,72
Perda de pressão na caldeira [m c.a.]	0,04	0,51
Perda de pressão no permutador [m c.a.]	1,39	1,13
Perdas Totais [m c.a.]	1,62	6,41

**Tabela 3.5 - Perdas de carga do sistema para os caudais mínimo e máximo**

### 3.3.3 Selecção da Bomba

A bomba a seleccionar deverá cobrir um caudal volúmico de água entre 0,9 m<sup>3</sup>/h e 4,5 m<sup>3</sup>/h. Visto que se tratam de valores bastantes díspares é recomendável que se use uma bomba que permita ter várias velocidades disponíveis de modo a que a regulação através da válvula globo seja mais simples.

O fornecedor escolhido foi a Wilo visto que é um fornecedor que já colaborou com a Bosch Termotechnika s.r.o., tem uma grande variedade de bombas e devido a qualidade dos seus produtos.

A perda de carga no sistema está estimada em 2 m c.a. para um caudal de 0,9 m<sup>3</sup>/h e 6,5 m c.a. para um caudal de 4,5 m<sup>3</sup>/h.

A bomba seleccionada foi a Wilo TOP - S 40/7 pois permite 3 tipos de velocidade e é o modelo que tanto permite alcançar o caudal máximo desejado como tem uma altura manométrica na potência mínima que mais se aproxima da altura manométrica desejada.

O modelo seleccionado tem um motor eléctrico trifásico.

Em seguida, é apresentada a curva característica da bomba assim como o seu consumo energético.

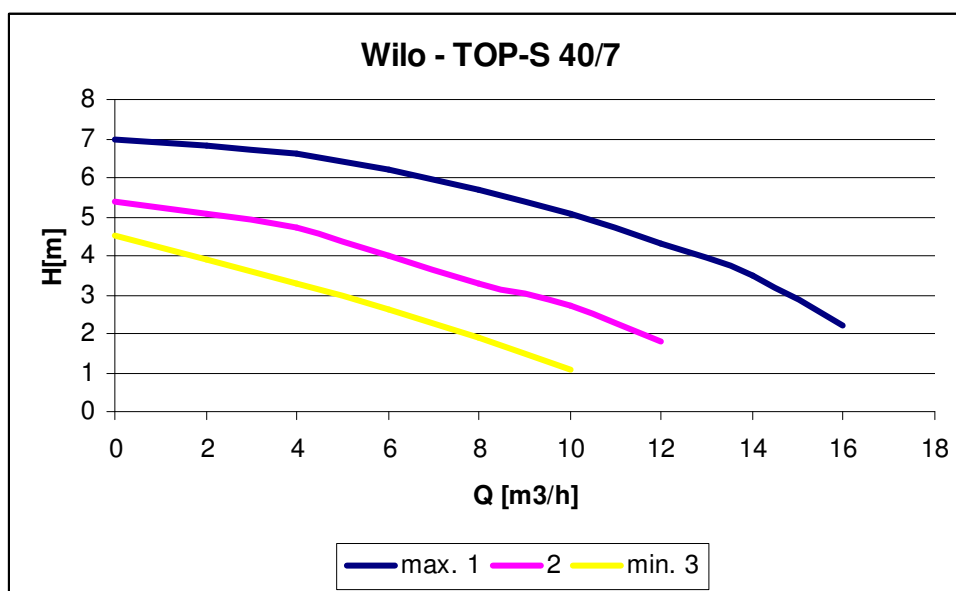


Gráfico 3.1 - Curvas características da bomba Wilo-TOP-S 40/7

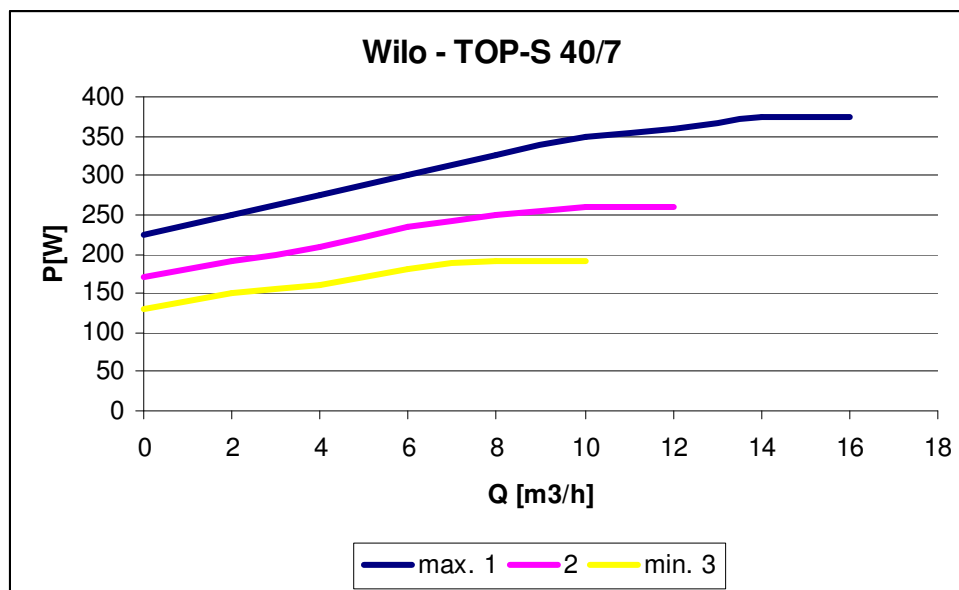
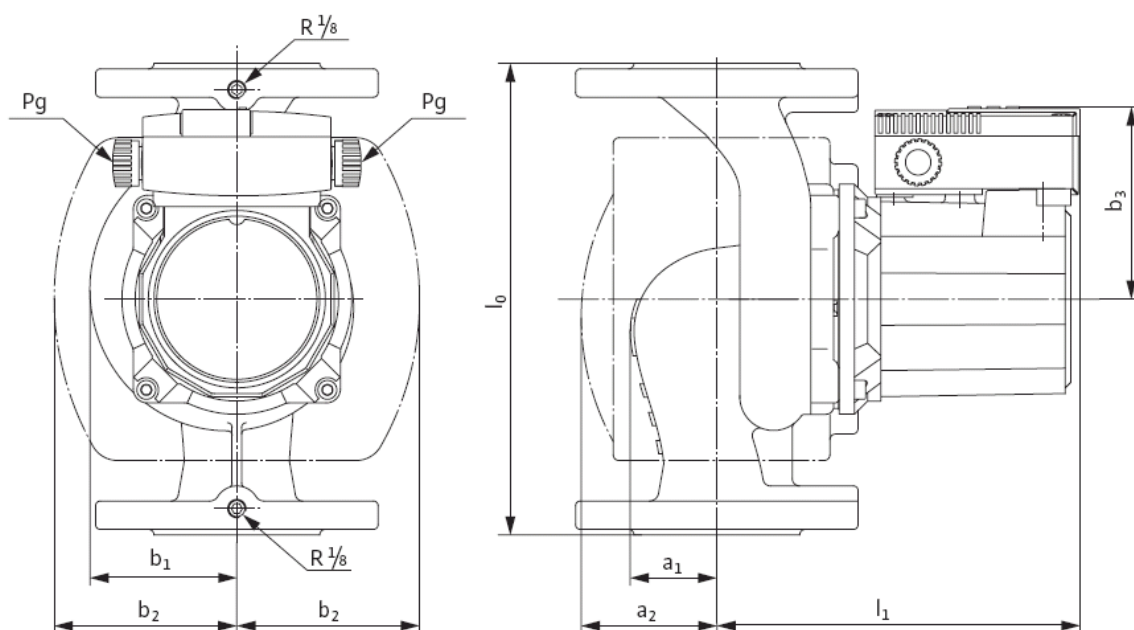


Gráfico 3.2 - Consumo energético da bomba WILO-TOP-S 40/7

Em seguida, é apresentado o esquema da bomba.



Esquema 3.8 - Bomba WILO-TOP-S 40/7

	Díâmetro Nominal [mm]	I <sub>0</sub> [mm]	a <sub>1</sub> [mm]	a <sub>2</sub> [mm]	l <sub>1</sub> [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]	b <sub>3</sub> [mm]	Peso [kg]
TOP-S 40/7	40	250	46	72	193	78	97	102	11

Tabela 3.6 - Dimensões e peso da bomba WILO-TOP-S 40/7

Na tabela seguinte são apresentadas as restantes características da bomba.

<b>Característica</b>	<b>40/7</b>
<b>Performance</b>	
<i>Altura manométrica máxima [m c.a.]</i>	7
<i>Caudal Volúmico Máximo [m³/h]</i>	16,5
<b>Condições de operação</b>	
<i>Gama de temperaturas de utilização</i>	-20 a 130
<i>Pressão máxima de operação [bar]</i>	6/10
<b>Ligações as tubagens</b>	
<i>Diâmetro nominal DN</i>	40
<b>Ligações eléctricas</b>	
<i>Conexão trifásica [V]</i>	400
<i>Frequência [Hz]</i>	50
<b>Materiais</b>	
<i>Carcaça da bomba</i>	Ferro fundido cinzento (EN-GJL-250)
<i>Impulsor</i>	Plástico (PP - 50% GF)
<i>Veio</i>	Aço inoxidável (X46 Cr13)
<i>Rolamentos</i>	Aço ao carbono
<b>Pressão mínima no ramo de sucção [m c.a.] para prevenção da ocorrência de cavitação</b>	
<i>50°C</i>	0,5
<i>95°C</i>	5
<i>110°C</i>	11
<i>130°C</i>	24

**Tabela 3.7 - Características da Bomba Wilo TOP-S 40/7**

### **3.4 Instrumentação**

A instrumentação a ser utilizada será a instrumentação já utilizada na empresa por uma questão de redução de custos.

Assim, os caudalímetros, sensores de temperatura e pressão e os medidores dos gases não foram sujeitos a um processo de selecção.

Porém foi tido algum cuidado durante a concepção da banca com vista um correcto funcionamento da instalação tendo em atenção a acessibilidade dos seus constituintes e a que escoamento nos caudalímetros estivesse totalmente desenvolvido.

## **4 Principais Causas de Falhas em Caldeiras a Combustíveis Sólidos**

Este capítulo irá incidir sobre as principais causas de falhas em caldeiras a combustíveis sólidos sobre a responsabilidade da equipa de desenvolvimento - concepção, dimensionamento e selecção de materiais. Problemas derivados do processo produtivo, tais como má qualidade da pintura, soldadura, vazamento e isolamento, não serão discutidos.

Os principais processos que originam falhas em caldeiras a combustíveis sólidos são:

- Corrosão;
- Erosão;
- Fadiga;
- Efeito combinado da corrosão, erosão e fadiga;
- Deformação - Fluência.

### **4.1 Corrosão**

Numa caldeira a combustíveis sólidos, os principais componentes corroídos são os componentes de ferro fundido ou aço que se encontram em contacto com os gases de combustão ou com água do sistema de aquecimento central.

O ferro fundido e o aço são os mais versáteis, menos caros e mais usados dos metais em engenharia. São inigualáveis no que diz respeito à gama de características físicas e mecânicas que se podem produzir através de tratamentos térmicos e ligas. A sua maior desvantagem é baixa resistência a corrosão, mesmo em ambientes pouco agressivos, que o ferro e a maioria das suas ligas possuem necessitando normalmente de revestimentos ou de condicionamento das condições ambientais.

Corrosão a alta temperatura é um tipo de corrosão que não necessita da presença de um líquido electrolítico. A corrosão a altas temperaturas consiste em vários processos de degradação dos materiais, oxidação, sulfuração e carbonização.

### 4.1.1 Oxidação

A oxidação é geralmente considerada como a forma de corrosão mais comum a altas temperaturas.

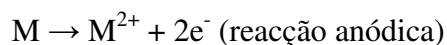
Em muitos processos industriais, a oxidação não ocorre isoladamente; é antes o resultado da combinação de mecanismos de corrosão a alta temperatura que causam degradação dos materiais quando na presença de contaminantes (sulfuretos, crómio, vanádio, etc.) que estão presentes na atmosfera.

Para um determinado material, a temperatura de operação assume um papel muito importante na taxa de corrosão, à medida que a temperatura aumenta, a taxa de oxidação também aumenta.

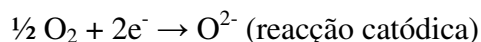
A oxidação a altas temperaturas é precedida por um mecanismo electroquímico, com algumas similaridades com a corrosão aquosa. Por exemplo, a reacção:



é precedida por duas reacções básicas distintas:



e



Apesar de existir literatura variada sobre corrosão a alta temperatura ao ar ou em gases de combustão pobres em sulfuretos, na prática real, pequenas diferenças na composição do fluido do processo e nas condições de operação, influenciam bastante a taxa de corrosão. Portanto, a selecção de material mais correcta decorre da experiência de operação de sistemas similares (Roberge;2000).

### 4.1.2 Sulfuração

Sulfuração é um mecanismo de falha por corrosão bastante comum na corrosão a altas temperaturas.

Como o nome indica, está relacionada com a presença de sulfuretos. Quando este tipo de dano é analisado microscopicamente, é possível ver a frente de sulfuração na liga afectada. Um ataque localizado em picagens também é possível.

Este tipo de corrosão pode ocorrer em 3 situações distintas:

- Misturas de sulfuretos de hidrogénio e hidrogénio ou vapores de enxofre em ambientes redutores;
- Ambientes moderadamente redutores com uma mistura gasosa de hidrogénio, água, dióxido de carbono, monóxido de carbono e sulfito de hidrogénio;
- Atmosferas contaminadas por dióxido de enxofre.

### 4.1.3 Carbonização

Carbonização pode ocorrer quando as metais são expostos ao monóxido de carbono, etano e hidrocarbonetos a alta temperatura.

O carbono combina-se primariamente com o crómio mas também se pode combinar com Nb, W, Mo e Ti para formarem carbonetos. O efeito mais indesejado é a fragilização e redução da ductilidade a temperaturas superiores a 482°C.

Ao formar carbonetos ricos em crómio, a carbonização também reduz a resistência à corrosão. É possível o aumento de tensões internas provocadas pela absorção do carbono e a formação de carbonetos. Esta pressão interna representa tensões que se vão sobrepor as tensões de operação.

A carbonização está principalmente associada à exposição a altas temperaturas ao dióxido de carbono, metano e outros hidrocarbonetos.

Usualmente, a carbonização não ocorre a temperatura inferiores a 815°C devido a condições de cinética química pouco favoráveis a baixas temperaturas.

### 4.1.4 Cinzas e Condensação

Em muitas aplicações industriais, as superfícies a altas temperatura não são limpas, ocorrendo de cinzas nas suas superfícies. Por outro lado, ocorre condensação dentro do sistema aquando da operação a baixas temperaturas ou durante paragens. A deposição das cinzas e de sais na superfície das tubagens e permutadores, promove reacções químicas que ocorrem entre estes depósitos e as superfícies metálicas, podendo levar à destruição dos óxidos e originar um ataque corrosivo rápido.

## **4.2 Erosão**

Erosão em tubagem é causada por bolhas, areia ou outro tipo de material sólido que colide com a superfície interna da tubagem. Geralmente a velocidades inferiores a 30m/s, erosão não é significativa desde que não haja cavitação. Quando materiais sólidos são arrastados pelo fluido a altas velocidades, os efeitos da erosão são rápidos, especialmente em deflectores. Portanto, não se deverão utilizar altas velocidades em sistemas onde estejam presentes suspensões sólidas.

## **4.3 Cargas Cíclicas de Origem Térmica**

Os ciclos de térmicos induzem tensões de origem térmica nos materiais. Estas tensões são especialmente importantes em locais onde existem diferentes materiais em contacto como zonas soldadas. A falha por fadiga é a fractura a baixas tensões que resulta da propagação de fendas como resultado de cargas cíclicas. Este efeito pode ser acomodado aquando do projecto para um determinado número de ciclos, um período de segurança, que normalmente anda entre os  $10^7$  e  $10^8$  ciclos de tensão.

Os processos de formação de fendas são uma sequência de eventos, desde a incubação, a enucleação de brechas e a sua propagação.

## **4.4 Efeito Combinado da Corrosão, Erosão e Cargas Cíclicas de Origem Térmica**

Os diferentes modos de falha anteriormente mencionados não ocorrem isoladamente. A erosão e as cargas cíclicas térmicas actuam como promotores da corrosão, aumentando a velocidade de degradação dos materiais.

### **4.4.1 Erosão-Corrosão**

Quando ferro fundido ou aço é corroído dentro de água, uma camada solúvel de óxido designada de magnetite é formada. Em condições de estado permanentes, a magnetite confere uma camada protectora de espessura constante que promove uma taxa de corrosão uniforme.

Se a magnetite for retirada por um filme de água ou por um jacto de água com velocidade elevada, a taxa de dissolução da magnetite aumenta. Isto resulta num aumento localizado da taxa de corrosão e a correspondente perda de metal da superfície. Visto que a retirada da magnetite é essencial no processo de corrosão, este processo foi denominado erosão-corrosão.



Existem vários factores que influenciam a taxa de erosão-corrosão. A percentagem da mistura, a composição do material, o pH, a composição química da água, o nível de oxigénio e o perfil de velocidade possuem grande influência sobre a taxa de erosão-corrosão.

Nas variáveis acima citadas, duas podem ser controladas durante a concepção, a selecção de materiais e as características do escoamento – velocidade e turbulência do fluido de trabalho.

### **4.4.1.1 Cavitação**

Cavitação está associada ao movimento rápido de partes móveis dentro de água, normalmente propulsores e bombas impulsoras. Durante o processo de cavitação, ocorre a formação de vapor de água em pequenas cavidade no qual o líquido colapsa, originando ondas de choque que atingem a superfície do metal. Estas perturbações vão destruir os filmes protectores, levando a uma superfície corroída de aspecto rugoso e com picadas.

A selecção de materiais pode mitigar este fenómeno através da escolha de materiais com boa resistência à corrosão em general, estabilidade química e elevada dureza superficial.

### **4.4.2 Fadiga-Corrosão**

A fadiga-corrosão é o processo pelo qual o metal fractura prematuramente sob condições de carregamento cíclico e de corrosão a tensões inferiores e ao fim de menos ciclos do que ocorre na ausência do ambiente corrosivo.

A esperança de vida útil não depende somente das propriedades do metal e da tensão aplicada mas também da natureza do ambiente. Todos os ambientes têm influência sobre a fadiga porém verifica-se que a resistência a fadiga é bastante diminuída quando se substitui o ar ambiente por um meio aquoso, no qual a resistência à fadiga sofre interacção mecânica e electroquímica. O seu efeito é normalmente quantificado comparativamente a testes de fadiga realizados em laboratório, normalmente por flexão rotativa usando amostras internacionalmente normalizadas.

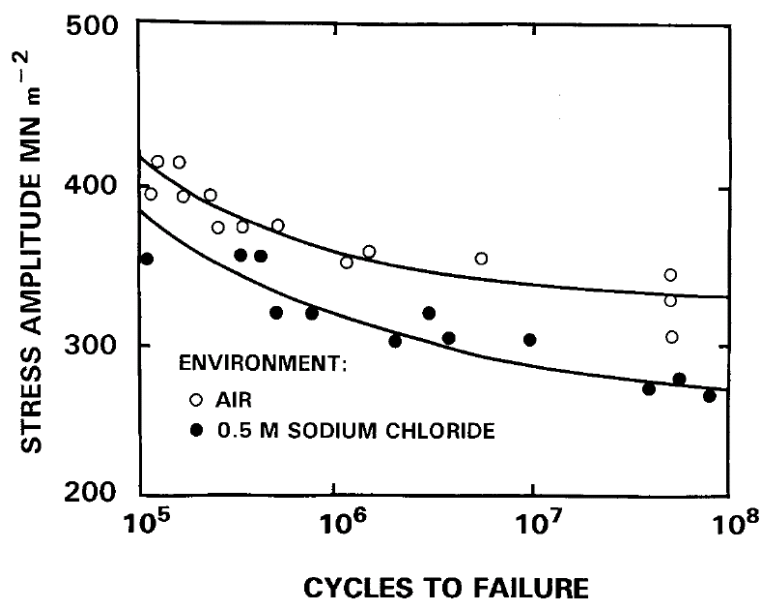


Gráfico 4.1 - Relação entre tensão aplicada e n.º de ciclos para a ruptura em ambientes corrosivos (Talbot, 2006)

#### 4.4.2.1 Influência do Ambiente

Várias interações entre o ambiente e o campo de tensões são possíveis:

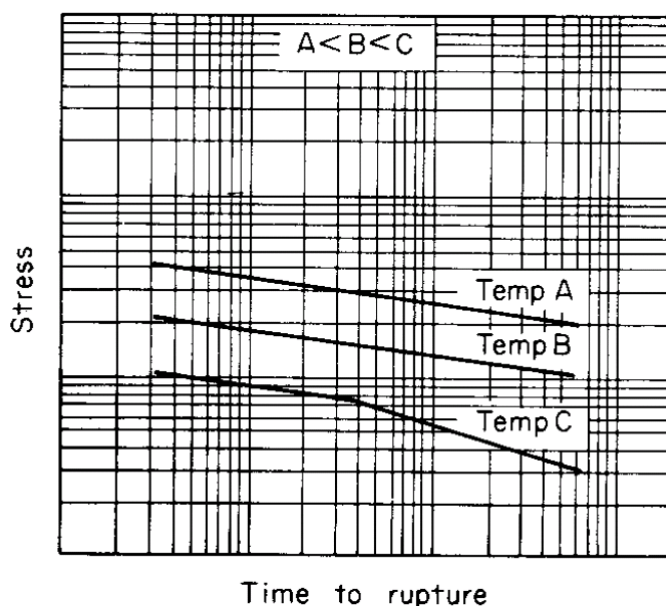
- Dano local como picada originado por corrosão intensificam as tensões superficiais;
- Estimulação da dissolução de metal na superfície das fendas;
- Dissolução de metal exposto pela corrosão dos filmes protectores passivamente formados;
- Endurecimento localizado por absorção de hidrogénio proveniente de reacções catódicas.

De acordo com as circunstâncias, existem outros factores contributivos. O dano causado por corrosão local, da mesma forma que numa superfície com imperfeições, vai aumentar as tensões superficiais acima da tensão nominal, reduzindo a resistência à fadiga.

### 4.5 Fluência

A uma temperatura suficientemente elevada, todos os metais se deformam quando sujeitos a uma tensão. Quanto maior for a temperatura e a tensão aplicada, maior será a deformação plástica para um determinado metal.

Fluência é definida com a deformação ao longo do tempo de um material que ocorre sob tensão a altas temperaturas. Metais que sofrem fluência vão acumular progressivamente um grande número de danos microscópicos na estrutura do material.



**Gráfico 4.2 - Relação genérica entre temperatura, tensão e tempo para a ruptura (Talbot, 2006)**

A determinação do dano provocado pela fluência, e a sua influência sobre a operação segura do componente, levou a criação de uma análise complexa para a estimação do período de vida útil do componente.

O grau de dano microestrutural pode ser avaliado por procedimentos metalográficos convencionais que podem ter uma abordagem destrutiva ou não destrutiva.

## 5 Metodologia de Definição das Falhas - FMEA

A definição das falhas, o modo como surgem e seus efeitos, é elaborada a partir de um documento designado por FMEA - *Failure Mode and Effects Analysis*.

A FMEA é feita em conjunto por membros de diferentes departamentos, Gestão de Produto, Desenvolvimento, Serviço Pós-venda, Qualidade, Engenharia de Processo e Gestão de Produção. Se necessário, serão envolvidas outras equipas na elaboração do documento.

Na elaboração da FMEA, as responsabilidades repartem-se do seguinte modo:

- |            |                          |
|------------|--------------------------|
| - Sistema  | - Desenvolvimento        |
|            | - Gestão de Produto      |
| - Conceção | - Desenvolvimento        |
|            | - Engenharia de Processo |
| - Processo | - Engenharia de Processo |
|            | - Desenvolvimento        |

Durante a elaboração da FMEA é feita a análise de risco durante a qual são quantificados ou qualificados os seguintes parâmetros - significância, probabilidade de ocorrência e detecção da falha.

## Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos

No quadro seguinte, é possível verificar o sistema de qualificação utilizado.

Significância da Falha “S”	Probabilidade de Ocorrência “O”		Deteção da Probabilidade “D”
<b>Crítica</b> 10. Perigo de danos físicos a terceiros <b>Severa</b> 9. Violação de leis e normas necessários que levem a retirada da licença de comercialização 8. Falha imprevista que ocorre em momento inconveniente e que impede a sua operação 7. Equipamento não pode ser instalado, ligado ou operado a longo prazo <b>Moderada</b> 6. Uso limitado 5. Equipamento não consegue alcançar características pretendidas <b>Leve</b> 4. Insignificante limitação no uso 3. A limitação é subjectiva <b>Insignificante</b> 2. Utilizador pode não se aperceber da limitação 1. Limitação só pode ser detectada por um especialista	<b>Muito Alta</b> 10. É certo que a falha irá ocorrer em grande escala 9. Não se pode excluir que irão ocorrer falhas em grande escala <b>Alta</b> 8. A concepção do sistema é semelhante com sistemas que no passado mais frequentemente apresentaram falhas 7. A concepção do sistema é semelhante com sistemas que no passado frequentemente apresentaram falhas <b>Moderada</b> 6. A concepção do sistema é semelhante com sistemas que no passado apresentaram falhas 5. A concepção do sistema é semelhante com sistemas que no passado apresentaram pequenas falhas 4. A concepção do sistema é semelhante com sistemas que no passado apresentaram poucas falhas <b>Baixa</b> 3. Sistema Confiável, a concepção do sistema é semelhante com sistemas que no passado apresentaram escassas falhas 2. Sistema Confiável, a concepção do sistema é semelhante com sistemas que no passado apresentaram raras falhas <b>Improvável</b> 1. É improvável que a falha ocorra	1/10 1/20  1/50  1/100  1/200  1/500  1/1.000  1/2.000  1/20.000  1/1.000.000	<b>Improvável</b> 10. O problema não pode ser testado Falta de inspecção ou número muito reduzidos de amostras, falha que não diz respeito a produção mas a longevidade do produto <b>Muito Baixa</b> 9. Número reduzido de amostras <b>Baixa</b> 8. Não é fácil a detecção da falha Inspeção 100% manual ou visual de uma falha mensurável ou acessível 7. A falha é facilmente detectável Deteção visual <b>Moderada</b> 6. Inspeção a 100% passa/não passa feita manualmente ou visualmente 5. Inspeção a 100% automática sem atribuição obrigatória do equipamento ao departamento de retrabalho 4. Inspeção a 100% automática passa/não passa sem atribuição obrigatória do equipamento ao departamento de retrabalho <b>Alta</b> 3. Inspeção 100% automática com rejeição automática ou com atribuição obrigatória do equipamento ao departamento de retrabalho 2. Falha óbvia <b>Muito Alta</b> 1. Falha que será certamente detectada na próxima etapa do processo

**Tabela 5.1 - Definição do grau de criticidade do problema (Bosch, 2007)**

## Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos

A detecção da probabilidade de uma falha ocorrer é feita através de testes variados. No quadro seguinte é possível verificar que tipo de testes se tratam e o a probabilidade de falha a que se referem.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Cálculo da Tolerância				Sem Resultados									
Montagem de muitos equipamentos													
		Montagem de alguns equipamentos											
		Teste das amostras A, B e C											
		Teste de durabilidade com possibilidade de comparação											
										Teste de durabilidade sem possibilidade de comparação			
										Simulação/Cálculos			
			Testes de campo										
			Testes de campo com equipamentos produzidos em série										
		Revendedores / Experiência											
Métodos que fornecem resultados claros			Métodos para os quais existem experiências anteriores similares			Métodos para os quais não existem experiências anteriores ou que fornecem resultados pouco claros							

**Tabela 5.2 - Métodos de inquirição da probabilidade de ocorrência de uma falha (Bosch, 2007)**

No caso de existir uma falha, cujo produto de S por O por D for superior a 125 ou o produto de S por O for superior a 25, então o sistema terá que ser revisto e melhorado de forma a alcançar os valores limites. Ocasionalmente, sempre que for desejado, poder-se-á rever a falha.

## 6 Falhas a Avaliar em Testes de Durabilidade

Durante a elaboração da FMEA, são definidos os possíveis modos de falhas que podem estar relacionados com o sistema, a sua concepção ou o processo de funcionamento..

Os testes de durabilidade são instrumentos utilizados na detecção de falhas que ocorrem a longo prazo resultantes do desgaste dos equipamentos.

Os testes de durabilidade não se podem resumir ao trabalho em contínuo do sistema. É necessário definir qual é objectivo do teste, quais são as inspecções a realizar e as medições a efectuar.

A sua definição é feita através de outras metodologias também utilizadas na detecção de falhas:

- Testes de campo efectuados anteriormente em equipamentos similares;
- Comunicação com revendedores que comercializaram anteriormente equipamentos similares;
- Experiência no desenvolvimento de produtos similares;
- Simulação e cálculos.

A definição das peças críticas foi feita principalmente a partir da experiência no desenvolvimento anterior de produtos similares e comunicação por parte dos serviços pós-venda acerca de produtos anteriormente desenvolvidos.

Assim, verificaram-se que as peças críticas no funcionamento das caldeiras são:

- A grelha de suporte do combustível;
- O injector de ar;
- O permutador de calor.

## 6.1 Grelha de Suporte de Combustível

A grelha de suporte de combustível é o órgão da caldeira que suporta e orienta o combustível para a câmara de combustão, impede o combustível de cair no depósito de cinzas e, através do seu basculamento, permite aliviar a compactação do combustível na câmara de combustível.

No caso da grelha de suporte do combustível existente na gama DOR verifica-se que a grelha sofre a longo prazo uma deformação permanente.

A grelha pode suportar até 70kg e temperaturas entre 600°C e 1500°C.

O processo de degradação da grelha é a fluência. A longo prazo, a carga aplicada vai provocar uma deformação permanente da grelha podendo diminuir a funcionalidade da peça e, em caso limite, levar à sua destruição.

A diminuição da funcionalidade da grelha leva à perda de combustível para o reservatório de cinzas, impede a descompactação do combustível na câmara de combustível, dificultando a combustão, fazendo com que a eficiência da caldeira diminua.

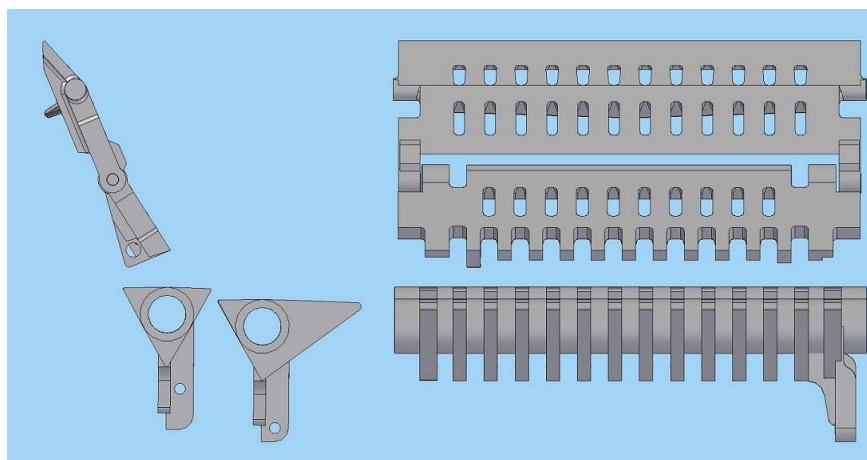


Figura 6.1 - Grelha de combustível

## 6.2 Injector de Ar

O injector de ar é o órgão da caldeira de gaseificação que promove a mistura do ar com os gases combustíveis produtos da pirólise. O injector encontra-se localizado entre a câmara de combustível, onde ocorre a pirólise, e a câmara de combustão. Os produtos da pirólise são forçados por ventilação a deslocarem-se da câmara de combustível para a câmara de combustão, através do injector. Ao passarem pelo injector, são misturados com ar exterior, e existindo uma temperatura adequada, dá-se a combustão.



Porém, os gases provenientes da câmara de combustão arrastam consigo cinzas resultantes da pirólise. A combinação de altas temperaturas, a rugosidade do cerâmico, turbulência provocada pelo injetor e o impacto das cinzas, faz com que, a longo prazo, se verifique a degradação do injetor como se pode observar na figura seguinte.



**Figura 6.2 - Injetor da gama PYRO após 5 anos de utilização**

O injetor da figura anterior, após de 4 anos de funcionamento em campo, encontra-se bastante degradado. De notar que o injetor adoptou formas mais suaves do que o injetor original, diminuindo a resistência a passagem de ar e, consequentemente, reduzindo a turbulência no interior do injetor.

A longo prazo, a degradação do injetor pode levar a sua destruição impedindo o funcionamento da caldeira. Porém, visto que o injetor promove a mistura ar combustível, visto que a sua concepção tem influência sobre a qualidade desta mistura, a sua degradação vai diminuindo a eficiência da combustão e consequentemente a eficiência da caldeira.

### **6.3 Permutador de Calor**

O permutador é o órgão da caldeira que permite a transferência de calor entre os gases de combustão e a água do sistema de água central.

Trata-se de um órgão sensível do ponto de vista técnico. Do ponto de vista de degradação, é um componente que está sujeito a muitas adversidades, corrosão aquosa no seu interior, corrosão por parte dos gases de combustão no seu exterior, altas temperaturas, deposição de cinzas e de sais (em caso de condensação), choques térmicos durante a operação da caldeira (visto que tem um controlo discreto com válvulas abre tudo/fecha tudo) e erosão devida ao impacto, no seu interior, das cinzas em suspensão na corrente gasosa.

## **Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos**

---

Por outro lado, visto que se trata de um componente volumoso, com grande quantidade de matéria-prima, logo um componente com grande peso na componente final de preço, é delicado alterar o dimensionamento do permutador. Além do mais, mesmo que a quantidade de matéria-prima não estivesse em questão, aumentar a espessura da parede do permutador, iria diminuir a sua eficiência. Portanto, é necessário otimizar o dimensionamento de modo a que se encontre a relação óptima entre a sua eficiência, durabilidade e preço final.

A degradação do permutador pode originar a longo prazo rupturas no permutador tornando a caldeira inoperacional.



**Figura 6.3 - Permutador de calor da Gama FB**

## **7 Metodologia de Avaliação de Falhas**

Os métodos de avaliação das falhas são os métodos que irão ser utilizados para quantificar e/ou qualificar as falhas. Um conhecimento claro destas características permitirá melhor avaliar a probabilidade de a falha ocorrer e fornecer informação à equipa de desenvolvimento no sentido da melhoria dos produtos existentes e na optimização de futuros produtos.

### **7.1 Requisitos**

A definição de um método de avaliação não se pode focar apenas nos métodos disponíveis e no objecto a avaliar. Tem de ter ainda em conta os recursos humanos disponíveis e o objectivo final dos resultados.

A avaliação das falhas consiste numa série de acções:

- Interpretação das especificações;
- Medição e comparação com a especificação;
- Decidir sobre a conformidade;
- Classificar conformidade;
- Classificar as não conformidades;
- Reportar a informação obtida.

#### **7.1.1 Qualificação da Mão-de-obra**

Os recursos humanos disponíveis tem imensa importância aquando da definição dos métodos de avaliação das falhas. A sua qualificação vai influenciar o método seleccionado, durante a fase de recolha de dados mas também no seu processamento.

Na Bosch Termotechnika s.r.o., o técnico de laboratório tem um conhecimento derivado de anos de prática e de conhecimento empírico. A introdução de uma nova técnica tem de ter em conta a capacidade do operador compreender o que está a fazer e a dificuldade de adaptação do operador. Ignorando-se estes factores, podemos incorrer em medições mal feitas, colocando o teste de durabilidade em causa. O processamento da informação recolhida através da análise deverá ser de processamento imediato, evitando cálculos adicionais para os quais os recursos humanos existentes não têm qualificação.

### **7.1.2 Quantificação dos Resultados**

Na prática, o operador pode ter alguma dificuldade em interpretar alguma especificação. Pode-se diminuir esta dificuldade de várias formas:

- Clarificando o significado da terminologia utilizada, evitando descrições qualitativas que são geralmente confusas;
- Eliminando informação vaga ou incompleta nas especificações;
- Classificando a importância das diferentes características do produto, evidenciando as mais importantes;
- Fornecendo amostras, fotografias ou outras referências para assistir a interpretação de determinada especificação; a importância de dados visuais não pode sobrevalorizada
- Revisão periódica das especificações de modo a eliminar problemas crónicos e recorrentes de interpretação.

Visto que a informação que se vai retirar do teste de durabilidade, não será apenas classificar se o sistema está conforme ou não, mas também verificar se a evolução das características, de forma a melhorar a concepção do produto, pretende-se que a avaliação seja o mais quantitativa quanto possível. Deste modo, não só se evita avaliações subjectivas mas também se pudera fazer previsões mais assertivas da vida útil do componente.

### **7.1.3 Características a Analisar**

O tipo de análise que vamos efectuar aos componentes deverá ter em conta a sua criticidade. Assim, um componente que na FMEA é definido como crítico (por exemplo, o injector) terá que se efectuar uma análise quantitativa. Um componente que não é crítico em testes de durabilidade deverá ser efectuada uma análise qualitativa - conforme/não conforme.

No teste de durabilidade de caldeiras, as peças críticas são o injector, a grelha e o permutador de calor.

As características a analisar serão:

- Injetor - avanço da erosão;
- Grelha - deformação plástica;
- Permutador de calor - avanço da corrosão.

## **7.2 Métodos Seleccionados**

### **7.2.1 Permutador de Calor**

A inspecção da evolução da espessura da parede do permutador irá ser realizada por ultra-sons.

A inspecção por ultra-sons é uma das técnicas de inspecção mais utilizadas podendo ser aplicada a uma grande variedade de materiais e condições de operação.

Este tipo de injeção é efectuada recorrendo a um dispositivo que gera uma onda sonora através de cristais piezoeléctricos com uma frequência entre 0,1 e 25 MHz para a peça a ser examinada analisando o sinal de retorno. O dispositivo mede o tempo que leva o sinal de retorno. É completamente um dispositivo portátil apenas exigindo que a sonda esteja em contacto directo com uma superfície limpa, a fim de obter informações precisas.

Os materiais a testar devem permitir a propagação acústica e ter uma configuração geométrica que permita a introdução e detecção da energia acústica de reflexão.

As variações na leitura podem ser bastantes significativas pelo que se deverá efectuar uma avaliação sobre a qualidade do resultado obtido.

Este tipo de teste é não intrusivo, simples de usar e com resultados imediatos.

Através dos dados obtidos, pode-se obter a curva de perfil da corrosão no sistema e desta forma podemos prever a ruptura final. Este último ponto é bastante importante visto que nos vai permitir reduzir consideravelmente o período de teste.

Os equipamentos necessários a este teste serão um equipamento de ultra-sons capaz de medir a espessura de ferro fundido e aço e uma máquina fotográfica para registo fotográfico.

### **7.2.2 Injector**

O avanço da erosão no injector será registado por dois meios, inspecção visual e taxa de perda de material cerâmico.

Tanto a inspecção visual como a taxa de perda de material cerâmico são dois métodos não intrusivos e fáceis de por em prática.

A inspecção visual e o seu registo fotográfico vai permitir verificar a evolução da forma do injector ao longo do teste. A forma do injector é importante pois permite verificar o perfil

do escoamento dos gases da pirólise permitindo, à posteriori, o melhoramento da concepção do componente cerâmico.

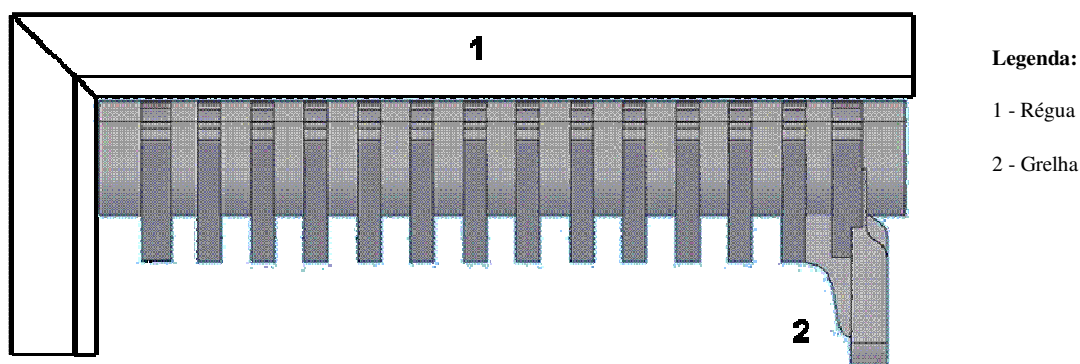
A taxa de perda de material cerâmico, recorrendo à medição regular da massa do injector, vai permitir extrapolar o valor da degradação do injector a longo prazo. Deste modo, poder-se-á prever a ruptura total do injector reduzindo deste modo o período de teste do injector.

Os equipamentos necessários a este teste serão uma balança com resolução de 0,001 kg e uma máquina fotográfica para registo fotográfico.

### 7.2.3 Grelha

A deformação da grelha de suporte de combustível será verificada através de registos fotográficos e da medição da deformação através de uma régua. No mercado, existem soluções que permitem uma melhor avaliação do sistema, como os extensómetros, porém a empresa não possui nem capacidade técnica nem vontade em investir numa parte do sistema que não é crítica do ponto de vista dos custos e é facilmente substituível.

A régua será disposta sobre a grelha e será medida a distância entre a régua e o ponto central da grelha como pode ser visto no seguinte esquema.



Esquema 7.1 - Método de medição da deformação da grelha

Os registos fotográficos e a medição da deformação permitirão acompanhar a evolução da fluência da grelha, e através do perfil da evolução da deformação da grelha prever quando se irá verificar a falha total. Esta última medição permitira reduzir o período de teste do sistema.

Os equipamentos necessários a este teste serão uma régua, um paquímetro e uma máquina fotográfica para registo fotográfico.

### 7.3 Pontos de Inspeção

Os pontos de inspeção tem de ter em conta os seguintes factores:

- Pontos que apresentaram problemas em modelos anteriores e sobre os quais resultaram queixas do consumidor final;
- Pontos em que as características do escoamento, temperatura, composição dos gases e deposição de condensados potenciem a ocorrência de falhas.

A definição dos primeiros advém de testes de durabilidade anteriormente realizados, testes de campo e relatórios provenientes dos distribuidores com as falhas observadas.

A definição dos segundos resultam da análise detalhada do produto a testar:

- No lado da água
  - pontos onde a velocidade e turbulência do caudal é máxima;
  - pontos onde possa ocorrer cavitação;
  - pontos onde o choque térmico é máximo;
  - pontos onde a concepção exigiu a utilização de materiais diferentes - soldaduras, vedações, ligações;
- No lado dos gases
  - pontos onde a velocidade e turbulência do caudal é máxima;
  - pontos onde o transporte de cinzas em suspensão é máximo;
  - pontos onde a temperatura é máxima;
  - pontos onde ocorrem condensados;
  - pontos onde a composição dos gases em óxidos, compostos ricos em enxofre e carbono é máxima.

### 7.4 Critérios de Aprovação

Os critérios de aprovação definem os valores para os quais os componentes em causa são aprovados após o teste de durabilidade.

Em testes de durabilidade, a definição destes valores passa pela sensibilidade do projectista do teste. No presente projecto, esta definição passou pela inquirição dos dois elementos mais experientes do departamento, com mais de 20 anos de experiência, acerca da sua opinião acerca do valor limite de degradação dos componentes.

Quanto ao permutador de calor, este será aprovado sempre que no final do teste de durabilidade não apresente falhas críticas e a extrapolação dos valores da taxa de corrosão indique uma espessura não inferior a 50% da espessura inicial. No final no teste, o permutador deverá ser seccionado com o auxílio de uma rebarbadora de modo a que se possa melhor inspeccionar o estado do permutador, em especial das zonas soldadas.

Quanto ao injector, será aprovado sempre que no final do teste de durabilidade não apresente falhas críticas e a extrapolação dos valores da taxa de erosão indique uma perda de material inferior a 50% da massa inicial.

Quanto à grelha de suporte de combustível, será aprovada sempre que no final do teste de durabilidade não apresente falhas críticas e a extrapolação dos valores da taxa de fluência indique uma deformação inferior a 5% do comprimento da grelha.



## 8 Teste de Durabilidade

Infelizmente, não foi possível testar o procedimento de teste de durabilidade. Esta impossibilidade deve-se a dois factores, o procedimento de teste de durabilidade está enquadrado num projecto mais abrangente - a zona de testes de durabilidade como se pode verificar no capítulo seguinte e a incapacidade do laboratório do desenvolvimento de responder a todas as chamadas. O teste do procedimento iria permitir verificar a sua operabilidade, sentir as dificuldades do operador na sua operação e, através das informações obtidas, melhorar o procedimento. Apesar deste contratempo, foi elaborada e arquivada documentação descritiva dos procedimentos e bancas de teste que permitirão a sua fácil implementação. De qualquer das maneiras, seria impossível realizar fazer um teste completo de durabilidade visto que este se estende por mais de 6 meses.

### 8.1 Definição das Condições do Teste

A temperatura a que vai decorrer o ensaio vai depender que tipo de corrosão se quer testar. No caso de se pretender testar a corrosão em operação normal a temperatura de teste é a temperatura máxima permitida pela caldeira, com um caudal correspondente à potência máxima. No caso de se pretender testar a corrosão a baixas temperaturas, a temperatura de teste é de 50°C, com um caudal correspondente à potência máxima.

A duração do teste será de 6 meses durante 8h por dia, com inspecções intermédias de mês em mês de operação.

Os resultados finais resultantes dos métodos de medição efectuados serão extrapolados para 6300h de operação, o correspondente a 5 anos de operação no utilizador final.

### 8.2 Definição do Procedimento de Teste

1. Instalação e inspecção primária
  - 1.1. Inspecção visual - danos na estrutura da caldeira e verificação dos componentes em falta
  - 1.2. Medição da espessura nos pontos definidos como críticos
  - 1.3. Se aplicável, medição da massa do injector
  - 1.4. Se aplicável, medição da deformação das diferentes partes da grelha
  - 1.5. Registo fotográfico dos componentes críticos e do sistema em geral
  - 1.6. Instalação da caldeira - de acordo com o manual de instruções
2. Teste de eficiência primário
  - 2.1. Medição
    - 2.1.1. Potência - mínima e nominal
    - 2.1.2. Emissões

## Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos

---

- 2.1.3. Temperatura da água na entrada
- 2.1.4. Temperatura da água no retorno
- 2.1.5. Temperatura dos gases de combustão
- 2.1.6. Eficiência (consumo de combustível)
- 3. Teste de durabilidade
  - 3.1. Condições
    - 3.1.1. Temperatura da água de saída
      - 3.1.1.1. Corrosão geral - temperatura máxima de operação
      - 3.1.1.2. Corrosão a baixas temperaturas - 50°C
    - 3.1.2. Temperatura da água no retorno - Temperatura máxima subtraída por 20°C
    - 3.1.3. Potência - Potência máxima da caldeira
    - 3.1.4. Serviço em contínuo - 6 meses
  - 3.2. Reabastecimento e limpeza
    - 3.2.1. A cada 3h, abastecer com o equivalente a 3 vezes o consumo de combustível
    - 3.2.2. Todos os dias, limpeza das cinzas
    - 3.2.3. A cada 240h, limpeza geral da caldeira
  - 3.3. Teste intermédio - mensal
    - 3.3.1. Teste de eficiência intermédio
      - 3.3.1.1. Medição
        - 3.3.1.1.1. Potência - mínima e nominal
        - 3.3.1.1.2. Emissões
        - 3.3.1.1.3. Temperatura da água na entrada
        - 3.3.1.1.4. Temperatura da água no retorno
        - 3.3.1.1.5. Temperatura dos gases de combustão
        - 3.3.1.1.6. Eficiência ( consumo de combustível)
      - 3.3.1.2. Inspeção do sistema
        - 3.3.1.2.1. Verificação da espessura da camada de cinzas
        - 3.3.1.2.2. Peças partidas ou deformadas
        - 3.3.1.2.3. Medição da espessura nos pontos definidos como críticos
        - 3.3.1.2.4. Se aplicável, medição da massa do injetor
        - 3.3.1.2.5. Se aplicável, medição da deformação das diferentes partes da grelha
        - 3.3.1.2.6. Registo fotográfico dos componentes críticos e do sistema em geral
- 4. Teste de performance final - no final de 6 meses
  - 4.1. Medição
    - 4.1.1. Potência - mínima e nominal
    - 4.1.2. Emissões
    - 4.1.3. Temperatura da água na entrada
    - 4.1.4. Temperatura da água no retorno
    - 4.1.5. Temperatura dos gases de combustão
    - 4.1.6. Eficiência (consumo de combustível)
- 5. Inspeção final do sistema
  - 5.1. Verificação da espessura da camada de cinzas
  - 5.2. Peças partidas ou deformadas
  - 5.3. Medição da espessura nos pontos definidos como críticos
  - 5.4. Se aplicável, medição da massa do injetor
  - 5.5. Se aplicável, medição da deformação das diferentes partes da grelha
  - 5.6. Registo fotográfico dos componentes críticos e do sistema em geral
- 6. Relatório final
  - 6.1. Referência à caldeira testada

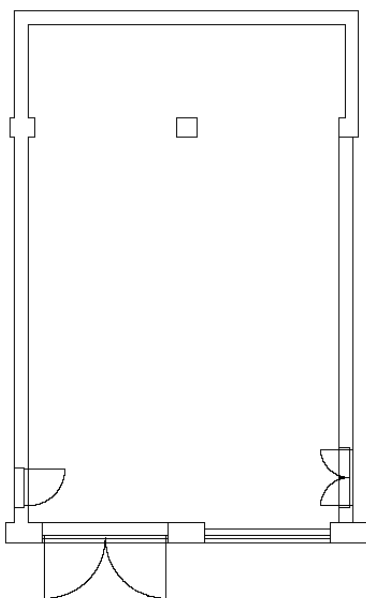
- 6.2. Objectivo do teste
- 6.3. Condições do teste
- 6.4. Registo fotográfico das peças críticas e do sistema em geral
- 6.5. Evolução da performance
- 6.6. Evolução da espessura da parede do permutador
- 6.7. Se aplicável, evolução da massa do injector
- 6.8. Se aplicável, evolução da deformação da grelha
- 6.9. Qualquer anomalia ocorrida durante o teste

### 8.3 Zona de Testes de Durabilidade

Visto que os testes de durabilidade se alargam por um período de tempo longo, tornou-se necessário criar uma zona exclusiva para testes de durabilidade. Visto que se pretendiam testar oito caldeiras em simultâneo era necessário criar uma zona de testes que primasse pela acessibilidade e pela simplicidade.

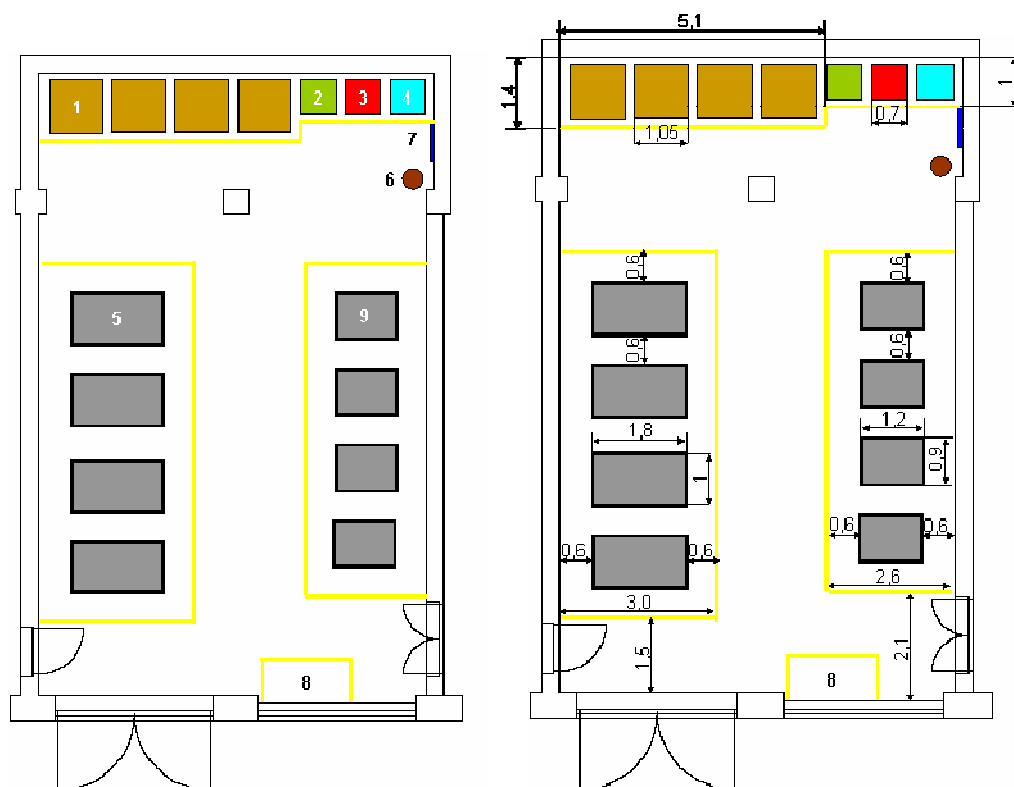
Nesta zona de testes, a instrumentação deverá ser reduzida ao necessário e deverá poder albergar todos os equipamentos necessários à performance dos testes.

Assim, foi fornecido a planta da área onde a zona de durabilidade ira ser criada.



**Esquema 8.1 - Planta da zona de durabilidade**

Inicialmente, foi definido a disposição das caldeiras e dos equipamentos necessários ao seu teste. As áreas foram definidas de modo que fosse possível o acesso a todas as áreas funcionais assim como o transporte de combustível e das caldeiras através do porta-paletes.

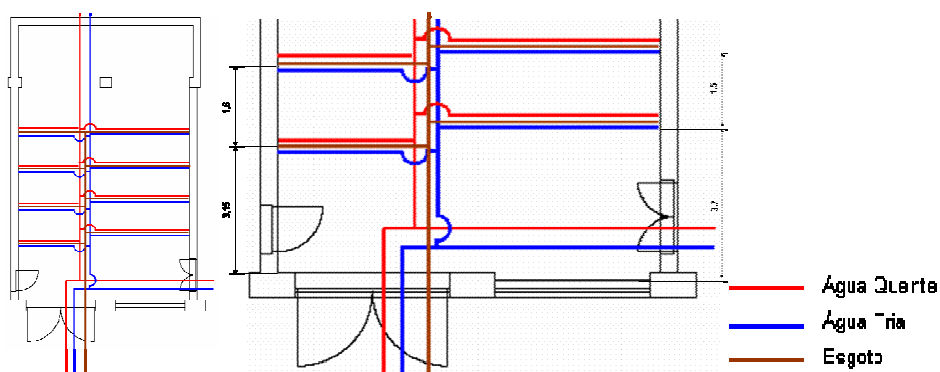


**Legenda:**

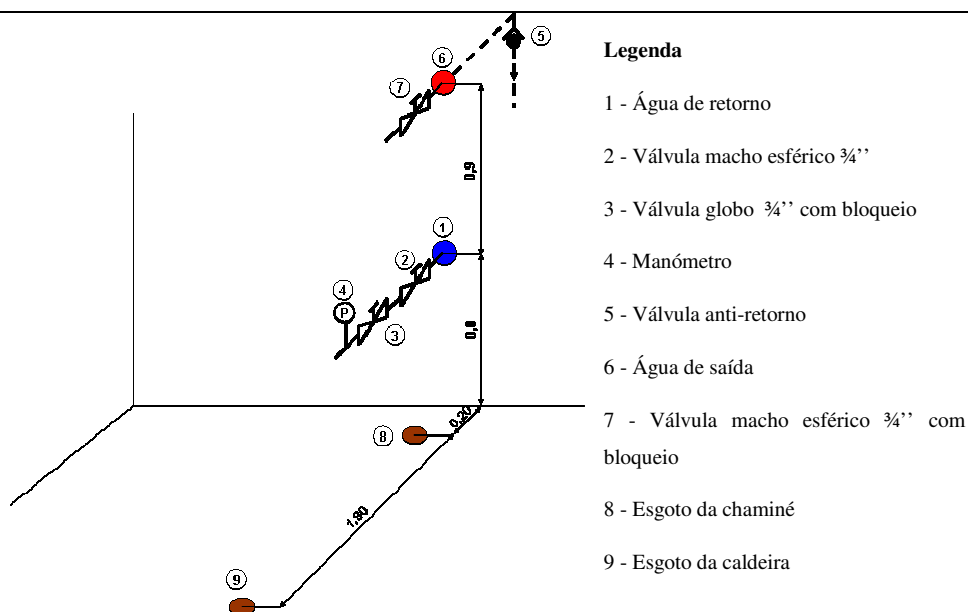
- |  |                       |
|--|-----------------------|
| 1 - Reserva de combustível                 | 2 - Caixa com papel   |
| 3 - Caixa com restos de madeira            | 4 - Caixa com cinza   |
| 5 - Caldeira com potencia superior a 100kW | 6 - Tronco de madeira |
| 7 - Quadro com ferramentas                 | 8 - Porta paletes     |
| 9 - Caldeira com potencia inferior a 100kW |                       |

**Esquema 8.2 - Disposição da Zona de durabilidade**

Em seguida, foi necessário definir o posicionamento das diferentes tubagens da área de durabilidade.

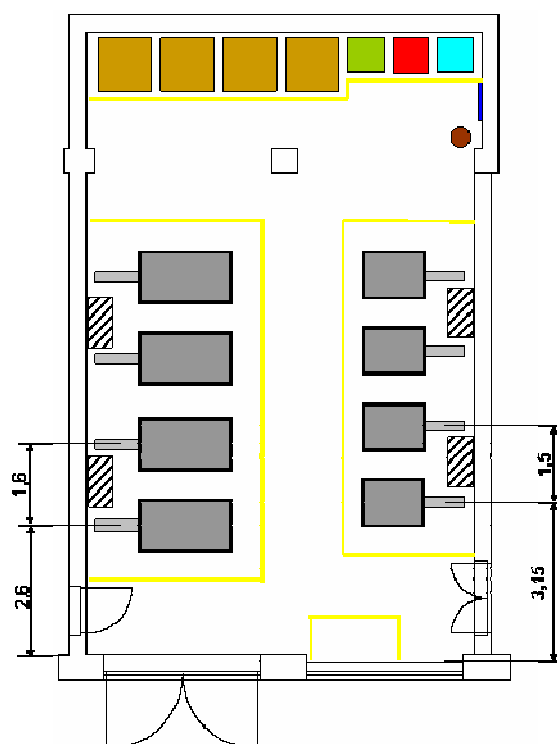


**Esquema 8.3 - Disposição (ou traçado) do sistema de tubagens**



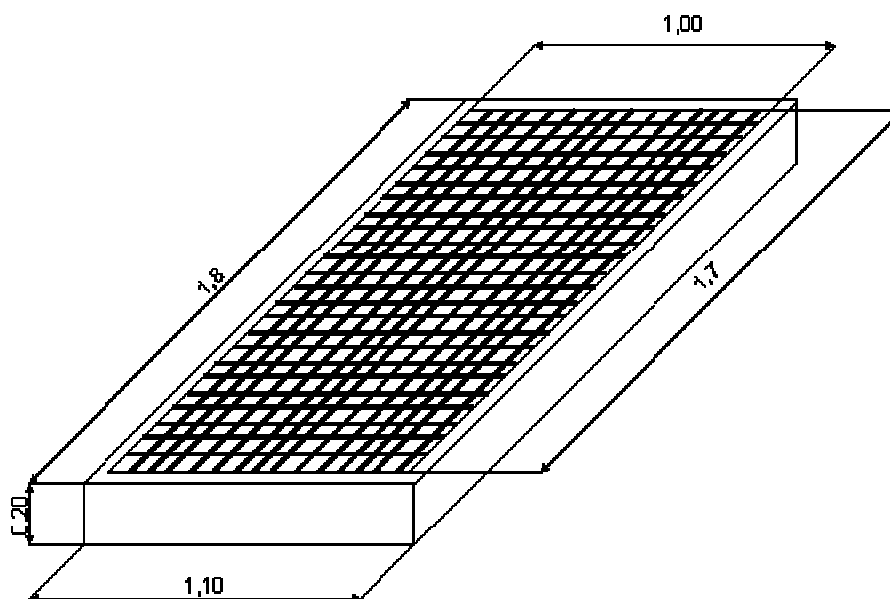
**Esquema 8.4 - Pormenor da ligação da caldeira ao sistema de tubagens**

Foi necessário também definir o posicionamento do sistema de exaustão da área de durabilidade.

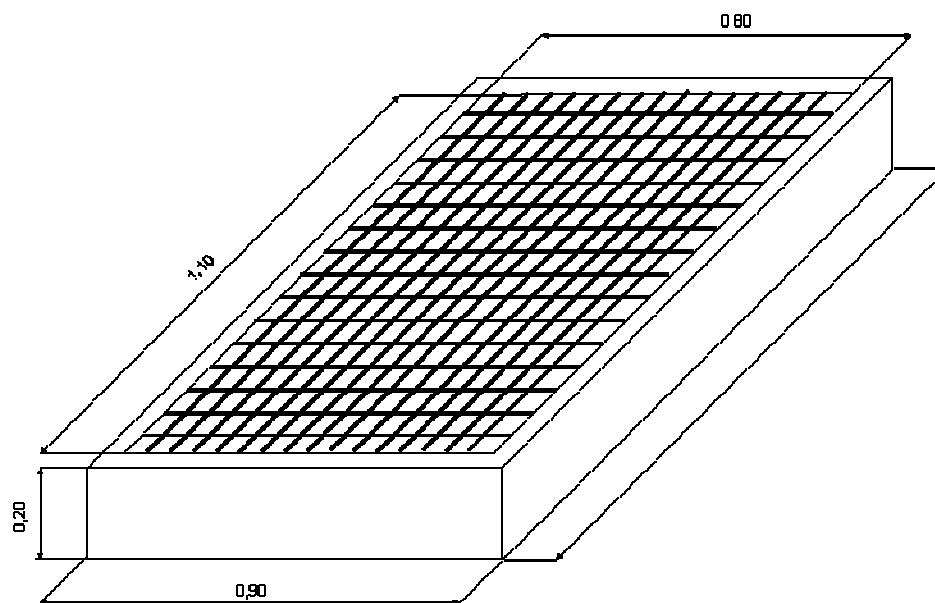


**Esquema 8.5 - Posicionamento do sistema de exaustão da área de durabilidade**

Para suportar as caldeiras, tornou-se indispensável definir a estrutura de suporte do sistema.



Esquema 8.6 - Estrutura de suporte para caldeiras até 500kg



Esquema 8.7 - Estrutura de suporte para caldeiras até 1000kg

À posteriori, as disposições e as estruturas definidas foram enviadas para uma empresa externa que será responsável pela construção da área de durabilidade.

## 9 Critérios de Robustez

No desenvolvimento de um produto, uma empresa pode ter duas políticas que vão definir a sua colocação no mercado, opta por desenvolver um produto que cumpra estritamente os requisitos das normas aplicáveis posicionando-se num mercado de baixa qualidade ou opta por desenvolver um produto que cumpra os requisitos das normas aplicáveis e requisitos internos, definidos pela empresa, que vão aumentar a robustez do produto, posicionando a empresa num segmento mais alto.

Evidentemente que a Bosch, uma empresa multinacional bastante reconhecida, não pode somente cumprir os requisitos definidos pelas normas aplicáveis. Uma falha decorrente de um evento não previsto pela norma em que resultassem prejuízos humanos e materiais, originaria uma publicidade negativa junto dos consumidores finais, destruindo uma reputação de qualidade que tem mais de 100 anos.

Surge portanto a necessidade de definir testes de robustez suplementares para as caldeiras a combustíveis sólidos.

A definição dos testes de robustez resulta da consulta bibliográfica de normas de origens diferentes (por exemplo: DIN e AS/NZS), da recolha da informação sobre testes de robustez realizados informalmente ou definidos para outros tipos de caldeiras na empresa e da criação de novos testes que parecem apropriados ao responsável pela definição dos testes.



## Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos

Na tabela seguinte, são enumerados os diferentes testes de robustez definidos, os seus objectivos, critérios de aprovação e sua origem.

n.º	Designação	Objectivo	Critério de Aprovação	Origem
1	Resistência ao impacto de painéis envidraçados	Simular o impacto externo nos painéis envidraçados prevenindo eventuais acidentes que possam causar danos materiais e pessoais	Sem dano	AS/NZS 3869:1999 - Appendix C
2	Resistência ao impacto da câmara de combustão	Simular o impacto do combustível na câmara de combustão aquando da sua alimentação prevenindo o dano precoce da caldeira	Sem dano	AS/NZS 3869:1999 - Appendix E
3	Resistência ao choque térmico do injector	Simular o choque térmico no injector quando sujeito a operações de limpeza após operação prevenindo o dano precoce do injector.	Sem dano	Interna
4	Resistência ao choque térmico dos painéis envidraçados	Simular o choque térmico nos painéis envidraçados aquando de operações de limpeza ou de projecção inadvertida de água prevenindo eventuais danos materiais e pessoais	Sem dano	AS/NZS 3869:1999 - Appendix D
5	Resistência externa ao choque térmico	Simular o choque térmico externo aquando de projecção accidental de água durante operações de limpeza ou inundações prevenindo eventuais danos materiais ou pessoais.	Ausência de fugas e zonas deformadas plasticamente	Interna
6	Resistência do permutador ao choque térmico	Simular choque térmico no permutador de calor prevenindo eventuais danos materiais e pessoais	Ausência de fugas e zonas deformadas plasticamente	Interna
7	Resistência ao choque térmico do flap da câmara de combustão	Resistência ao choque térmico do flap da câmara de combustível aquando de operações de limpeza após a operação prevenindo o seu dano precoce.	Sem dano	Interna
8	Integridade estrutural da caldeira	Simular as cargas a que as caldeiras são sujeitas durante as operações de instalação prevenindo o seu dano precoce.	Sem danos críticos	AS/NZS 3869:1999 - Appendix F
9	Integridade estrutural da caldeira	Simular a carga completa da câmara de combustível prevenindo a degradação precoce dos seus componentes.	Sem dano	AS/NZS 3869:1999

**Tabela 9.1 - Critérios de robustez, seus objectivos, critérios de aprovação e origem – n.º1 a 9**

## Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos

n.º	Designação	Objectivo	Critério de Aprovação	Origem
10	Temperatura das superfícies externas	Simular a temperatura das superfícies externas da caldeira prevenindo a possibilidade de danos humanos resultantes de queimaduras.	Temperatura da porta: menor do que 100K acima da temperatura ambiente; Temperatura da base: menor que 80°C; Temperatura de materiais que tenham que ser operados: - metais - menor do que 35K acima da temperatura ambiente; - cerâmica - menor do que 45K acima da temperatura ambiente; - plásticos - menor do que 60K acima da temperatura ambiente.	EN303
11	Resistência a pressão hidráulica	Simular sobrepressão hidráulica derivada de operação deficiente prevenindo danos humanos e materiais derivados de uma ruptura accidental	Sem fuga de água ou deformação plástica permanente	EN 304 - Appendix A.10
12	Resistência a variação de pressão hidráulica	Simular a variação da temperatura na caldeira ao longo da vida útil da caldeira prevenindo a sua falha precoce	Sem fuga de água ou deformação plástica permanente	Interna
13	Resistência a variação de temperatura	Simular a variação da temperatura na caldeira ao longo da vida útil da caldeira prevenindo a sua falha precoce	Sem fuga de água ou deformação plástica permanente	Interna
14	Resistência a erosão do injector	Simular a erosão no injector ao longo da vida útil da caldeira prevenindo a falha precoce do componente.	Sem falha critica	Interna
15	Teste de estanquicidade dos gases de combustão	Simular a fuga de gases de combustão durante operação	Caudal inferior a 0,5% do caudal total	Interna e EN 303
16	Teste de estanquicidade dos gases de combustão após teste de resistência a pressão hidráulica	Simular a fuga de gases de combustão após condições de operação extremas	Caudal inferior a 2% do caudal total	Interna e EN 303
17	Teste de estanquicidade dos gases de combustão após teste de resistência a variação de pressão hidráulica	Simular a fuga de gases de combustão no final de vida útil da caldeira	Caudal inferior a 2% do caudal total	Interna e EN 303

**Tabela 9.2 - Critérios de robustez, seus objectivos, critérios de aprovação e origem – n.º 10 a 17**

## Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos

n.º	Designação	Objectivo	Critério de Aprovação	Origem
19	Exaustão deficiente de gases de escape	Simular o funcionamento da caldeira em locais com sistema de exaustão subdimensionada	Sem influência crítica no funcionamento	EN 15270
20	Funcionamento com elevado quantidade de cinzas	Simular o comportamento da caldeira com excesso de cinzas na câmara de combustão	Sem influência crítica no funcionamento	Interna
21	Funcionamento com baixa temperatura do ar de combustão	Simular o comportamento da caldeira com temperatura de admissão do ar bastante baixa.	Sem influencia crítica no funcionamento	Interna
22	Funcionamento com humidade do ar de 100%	Simular o comportamento da caldeira com admissão de ar com humidade de 100%	Sem influência crítica no funcionamento	Interna
23	Funcionamento com elevado nível de concentração de CO no ar	Simular o comportamento da caldeira com admissão de ar com alta concentração de CO	Sem influência crítica no funcionamento	Interna
24	Funcionamento com elevado nível de concentração de CO <sub>2</sub> no ar	Simular o comportamento da caldeira com admissão de ar com alta concentração de CO <sub>2</sub>	Sem influência crítica no funcionamento	Interna
25	Funcionamento com elevado nível de partículas sólidas em suspensão	Simular o comportamento da caldeira com admissão de ar com elevada quantidade de partículas sólidas em suspensão.	Sem influência crítica no funcionamento	Interna
26	Funcionamento com condensação na caldeira	Simular o comportamento da caldeira com condensação dos gases de combustão no permutador	Sem influência crítica no funcionamento	Interna
27	Funcionamento com condensação na exaustão	Simular o funcionamento da caldeira aquando da ocorrência de condensação na exaustão	Sem influência crítica no funcionamento	Interna
28	Funcionamento com caldeira sem água	Simular o funcionamento da caldeira de modo a verificar a eficácia do dispositivo de dissipação de calor em situações extremas	Sem influência crítica no funcionamento	Interna
29	Chamas e brasas	Verificar se a abertura da porta da câmara de combustível não provoca a saída de chamas nem de brasas prevenindo a ocorrência de danos pessoais e materiais	Chamas não podem sair através da porta da câmara de combustão e brasas não devem cair fora da câmara de combustão	EN 303-5

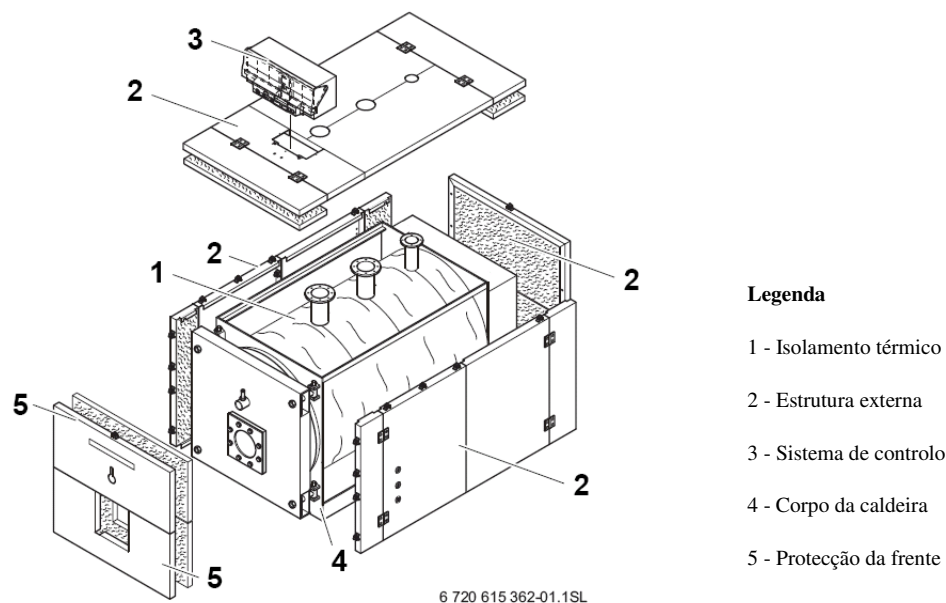
**Tabela 9.3 - Critérios de robustez, seus objectivos, critérios de aprovação e origem – n.º19 a 29**

Em anexo, encontram-se descritos os procedimentos de teste correspondentes a cada critério de robustez.

## 10 Estanquicidade da Gama de Caldeiras Prexal

As caldeiras da gama Prexal são caldeiras feitas em aço apropriadas para queima de combustíveis líquidos e gasosos com potências entre 85kW e 3500kW.

Esta gama possui uma eficiência até 93%, são de fácil instalação e manutenção, podem ter um controlo por degraus ou contínuo e podem ser montadas em série com outras caldeiras.



Esquema 10.1 - Logano 120kW a 2000kW

### 10.1 Problema

A gama de caldeiras Prexal é normamente vendida para o mercado da Europa de Leste, em especial para a Rússia. Nestes mercados, as caldeiras não são submetidas à bateria de testes a que estariam sujeitas se fossem comercializadas na Europa Ocidental. Visto que os quartéis centrais da Bosch Termotecnologia decidiram comercializar esta gama na Europa Ocidental, existiu necessidade de testar esta gama. Verificou-se que existia uma deformação plástica no painel frontal da caldeira. Visto que esta gama é somente produzida por encomenda, não se sabia a origem desta deformação, má tolerância do processo de fabrico ou deformação decorrente do teste de pressão hidráulica a que a caldeira é sujeita no controlo de qualidade da produção. Levantaram-se questões sobre a estanquicidade da gama de caldeiras e a influência desta deformação sobre a sua estanquicidade. Como ainda não haviam sido submetidas aos testes de “Resistência à Pressão Hidráulica” e “Resistência à Variação de Pressão Hidráulica”, decidiu-se testá-las e observar a evolução da sua estanquicidade e deformação plástica ao longo dos testes.

## **10.2 Critérios de Aprovação**

### **10.2.1 Estanquicidade da Caldeira**

A norma EN303 define o valor máximo de 2% do volume total de gases de escape como valor máximo de fuga de gases de escape. Porém a empresa adopta um critério mais apertado, 0,5% para caldeiras saídas da produção e 2% para caldeiras sujeitas aos testes de “Resistência à Pressão Hidráulica” e “Resistência à Variação de Pressão Hidráulica”. Os critérios mais apertados garantem aos projectistas que durante a vida útil da caldeira, a percentagem de fuga de gases de combustão nunca será superior ao estabelecido pela norma. A pressão definida para este teste é a pressão dos gases de escape multiplicada por 1,2.

### **10.2.2 Resistência à Variação de Pressão Hidráulica**

O critério de avaliação da resistência à variação de pressão da caldeira foi desenvolvido na filial alemã da Bosch Termotecnologia. A projectista do teste avaliou como o número de ciclos necessários ao teste de 300.000 ciclos no caso de uma diferença de 0,7 bar entre a pressão mínima e a pressão máxima e de 37.500 ciclos no caso de uma diferença de 1,4 bar.

No final do teste, a caldeira não deverá apresentar deformação plástica visível e não deverão existir fugas de água na caldeira.

### **10.2.3 Resistência à Pressão Hidráulica**

A norma aplicável informa que a caldeira deverá resistir a uma pressão hidráulica duas vezes superior à pressão de operação (CEN;1994).

No caso das caldeiras da gama Prexal, a pressão normal de operação é de 6bar (rel.) logo a pressão de teste será de 12bar (rel.).

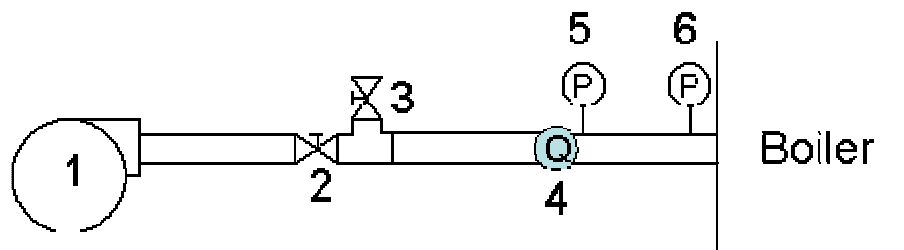
No final do teste, a caldeira não deverá apresentar deformação plástica visível e não deverão existir fugas de água na caldeira.

## 10.3 Bancas de Teste

### 10.3.1 Estanquicidade da Caldeira

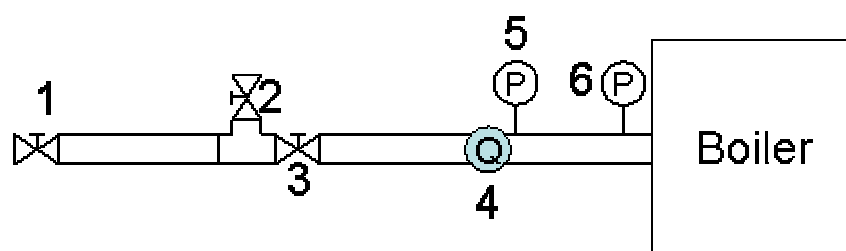
O desenvolvimento da banca de testes para o teste de estanquicidade teve em conta as seguintes necessidades:

- variedade das potências a testar - 120kW a 3500kW;
- utilização da instrumentação existente;
- utilização de componentes existentes ou facilmente produzidos internamente;
- simplicidade de uso.



#### Legenda

- |                |                  |
|----------------|------------------|
| 1 - Ventilador | 4 - Caudalímetro |
| 2 - Válvula 1  | 5 - Manómetro 1  |
| 3 - Válvula 2  | 6 - Manómetro 2  |



#### Legenda

- |                   |                  |
|-------------------|------------------|
| 1 - Ar comprimido | 4 - Caudalímetro |
| 2 - Válvula 1     | 5 - Manómetro 1  |
| 3 - Válvula 2     | 6 - Manómetro 2  |

**Esquema 10.2 - Bancas de teste para 'Estanquicidade da caldeira'**

Os componentes da instalação têm as seguintes funções:

- componente 1 - ventilador ou ar comprimido - alimentação de ar;
- válvulas 1 e 2 - controlo da pressão na caldeira;
- caudalímetro - medição do volume de ar que entra na caldeira;
- manómetro 1 - medição da pressão no caudalímetro possibilitando o cálculo do caudal mássico;
- manómetro 2 - medição da pressão na caldeira.

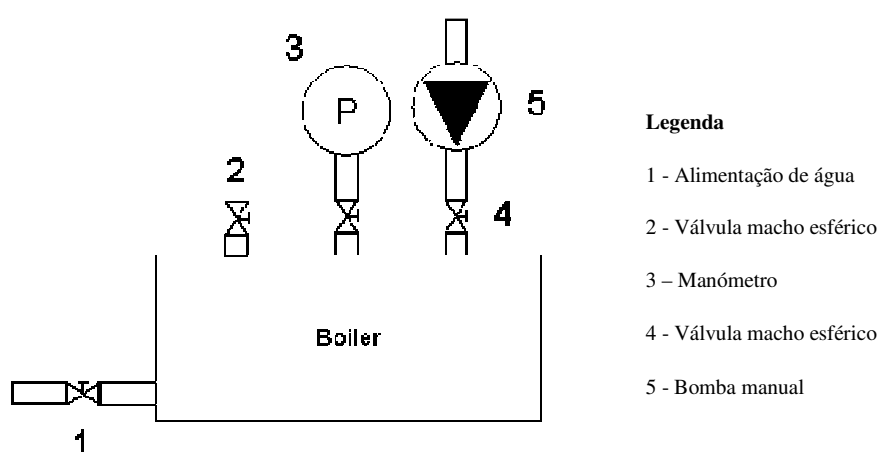
### 10.3.2 Resistência à Variação de Pressão Hidráulica

A banca de teste foi desenvolvida na Bosch Thermotechnik GmbH, filial alemã da Bosch Termotecnologia. A abordagem detalhada da banca de testes é feita no Anexo G.

### 10.3.3 Resistência à Pressão Hidráulica

O desenvolvimento da banca de testes para o teste de pressão hidráulica teve em conta as seguintes necessidades:

- variedade das potências a testar - 120kW a 3500kW;
- utilização da instrumentação existente;
- utilização de componentes existentes ou facilmente produzidos internamente;
- simplicidade de uso.



Esquema 10.3 - Banca de teste para 'Resistência à Pressão Hidráulica'

Através do componente 1, a caldeira é enchida sendo que o ar que nela se encontra sairá pelas válvulas 2, 3 e 4. Após o enchimento, abrindo a válvula 4, acciona-se manualmente a

bomba até atingir a pressão de 12bar (rel.) que poderão ser medidos através do componente 3 - o manómetro.

### 10.3.4 Medição da Deformação Plástica

A medição da deformação da frente da caldeira será efectuada através de uma régua e de um paquímetro.

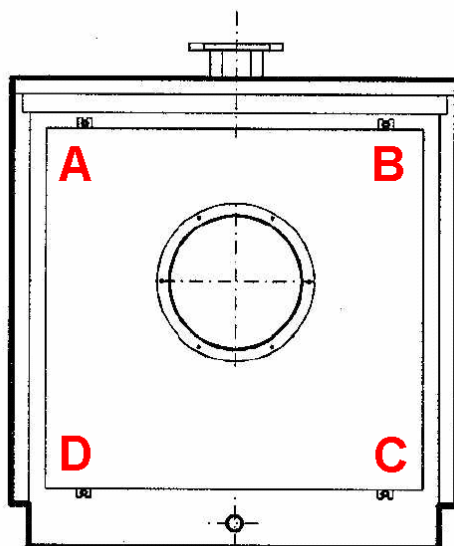


Figura 10.1 - Frente da caldeira com indicação da designação atribuída aos cantos



## 10.4 Resolução

Inicialmente foi realizado um teste de estanquicidade da caldeira antes de qualquer alteração no colector de gases de escape assim como a medição da deformação do painel frontal.

Os resultados do volume de fuga de ar podem ser consultados no gráfico seguinte.

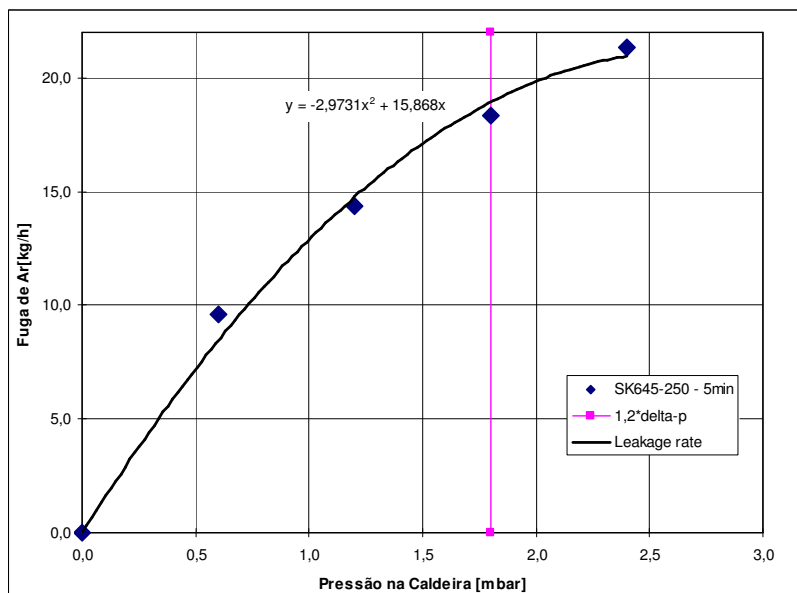


Gráfico 10.1 - Estanquicidade da caldeira original

Os resultados da deformação do painel frontal podem ser observados na tabela seguinte.

Segmento	A-B	B-C	C-D	D-A
Deformação [mm]	2,7	1,7	2,2	1,2

Tabela 10.1 - Deformação original do painel frontal

O volume de fuga de ar correspondeu a 4,84% do volume total de ar, bastante acima dos 2% definidos pela norma.

Verificou-se que as fugas principais ocorriam nos cantos do colector de gases de escape e na janela de inspecção da chama.



Tabela 10.2 - Fugas de ar: janela de inspeção (à dir.) e cantos do coletor de gases de combustão (à esq.)

Em seguida, foi realizado o teste de “Resistência à Variação da Pressão Hidráulica”.

Após 37500 ciclos, com pressão máxima de 6bar (rel.) e pressão mínima de 4,6bar (rel.), a caldeira não revelou deformação plástica visível nem qualquer fuga de água.

A caldeira foi aprovada quanto à resistência à variação de pressão hidráulica.

Após o teste, foi medida novamente a deformação do painel frontal da caldeira com os seguintes resultados.

Segmento	A-B	B-C	C-D	D-A
Deformação [mm]	3,1	1,7	2,7	1,4

Tabela 10.3 - Deformação do painel frontal após teste de "Resistência à Variação de Pressão Hidráulica"

Em seguida, foi efectuado o teste de “Estanquicidade da Caldeira”.

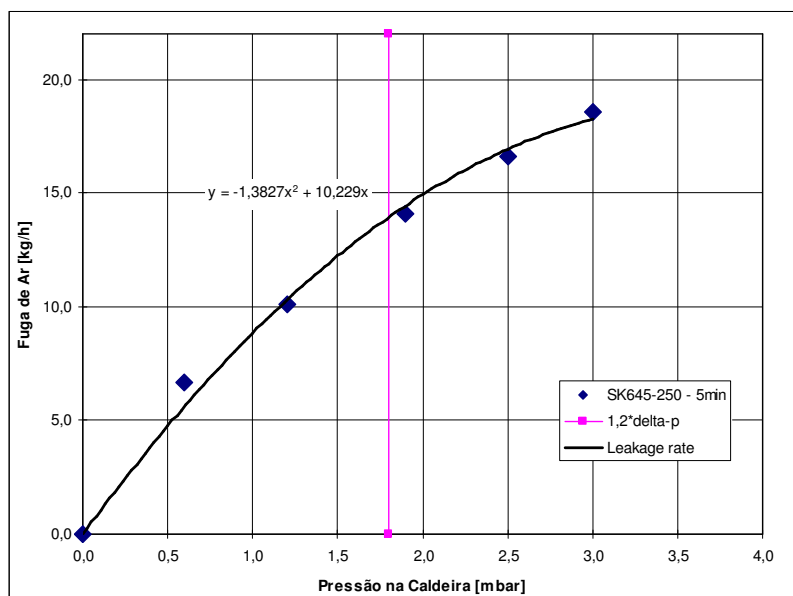


Gráfico 10.2 - Estanquicidade após teste de " Resistência à Variação de Pressão Hidráulica"

O volume de fuga de ar correspondeu a 3,24% do volume total de ar, bastante acima dos 2% definidos pelo norma.

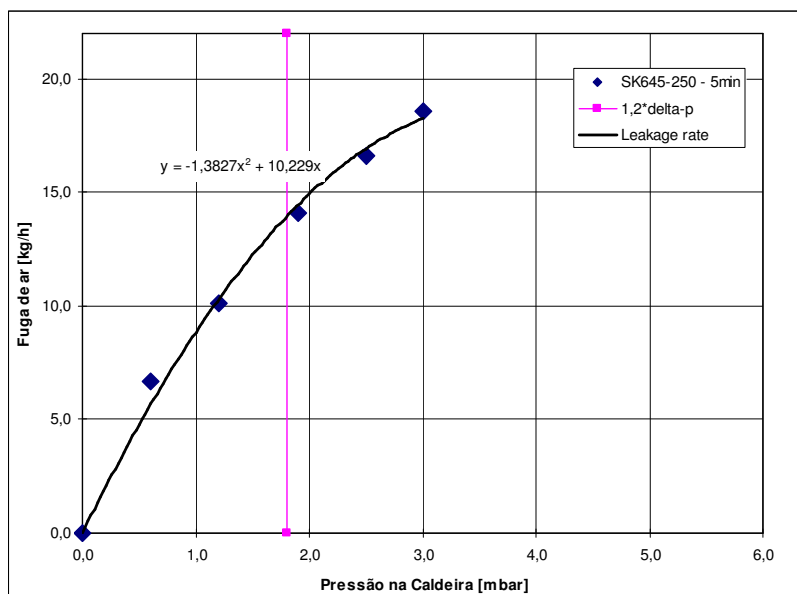
O teste de “Resistência à Pressão Hidráulica” foi realizado em seguida com a submissão da caldeira a uma pressão de 12bar (rel.). A caldeira não revelou qualquer deformação plástica visível ou fuga de água.

A medição da deformação do painel frontal forneceu os seguintes resultados.

Segmento	A-B	B-C	C-D	D-A
Deformação [mm]	2,9	1,5	2,6	1,6

**Tabela 10.4 - Deformação após teste de "Resistência à Pressão Hidráulica"**

Após o teste de “Resistência à Pressão Hidráulica”, foi efectuado o teste de “Estanquicidade da Caldeira” com os seguintes resultados.



**Gráfico 10.3 - Estanquicidade após teste de " Resistência à Pressão Hidráulica"**

O volume de fuga de ar correspondeu a 3,57% do volume total de ar, bastante acima dos 2% definidos pelo norma.

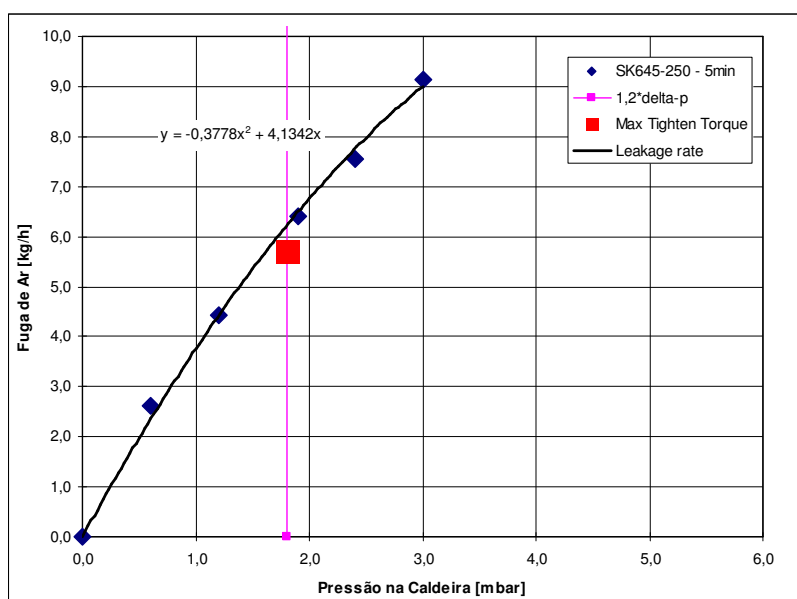
Como medida correctiva da fraca estanquicidade do colector de gases de escape foi decidido soldar os cantos do colector de escape.



**Figura 10.2 - Pormenor do canto do colector de gases de combustão soldado**

Em seguida, foi realizado dois novos testes de estanquicidade, um com o procedimento regular e outro com um aperto extraordinário das porcas que fixam o colector de gases de escape.

No gráfico seguinte, avaliam-se os resultados do teste.



**Gráfico 10.4 - Estanquicidade após a soldadura dos cantos do colector de gases de combustão**

O volume de fugas de ar foi de 1,59 % para o teste padrão e de 1,46 % para o teste com aperto extraordinário das porcas que fixam o colector de gases de escape. O valor já se encontra abaixo dos 2 % definidos pela norma porém acima dos 0,5 % definidos pela norma interna.

Foi colocado em questão se a disposição do vedante no colector de gases de combustão influencia o volume de fugas de ar. Assim, foram realizados mais quatro testes com o modelo 730 da gama Prexal.

As concepções testadas podem ser observadas nas imagens seguintes.



Figura 10.3 - Da esq. para a dir. – De série; Em cruz; Raio menor; Raio maior

Os resultados encontram-se resumidos na tabela seguinte.

Concepção	Fuga de ar	
	Massa [kg/h]	Rácio [%]
De série	35,9	3,20
Em cruz	13,3	1,19
Raio menor	18,5	1,65
Raio maior	32,5	2,89

Tabela 10.5 – Fuga de ar para as diferentes concepções

A relação entre a pressão pneumática e o caudal mássico de fugas de ar pode ser observado no seguinte gráfico.

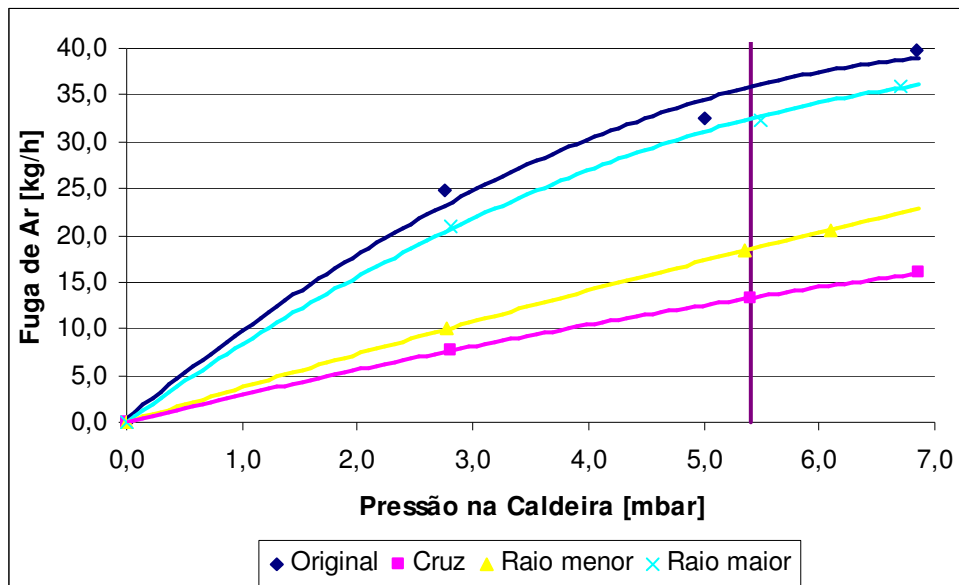


Gráfico 10.5 - Estanquidade da caldeira para as diferentes concepções da corda

Em nenhum dos casos se verifica um rácio de fugas inferior à norma interna. Porém a concepção em cruz já possibilita um rácio de 1,19%. Verifica-se que a corda com um maior

raio no canto do colector não melhora a estanquicidade e que a redução do rácio de fugas na concepção de raio menor se deve ao facto do colector ter sido soldado nos cantos aquando da operação de aumento do raio.

Visto que existia uma caldeira que necessitava de ser enviada para um cliente, foi necessário desenvolver uma solução provisória que garantisse a estanquicidade da caldeira. Assim, foram soldados os cantos do colector de gases de escape e foi colocado um vedante de silicone em volta do colector de gases de escape.



**Figura 10.4 - Silicone vedante utilizado na vedação do colector dos gases de combustão**

Os resultados do teste de estanquicidade revelaram que a fuga existente era de cerca de 0,65% do volume total de ar. Este valor encontra-se bastante abaixo do limite de 2% definido pela norma aplicável e bastante próximo do valor definido pela norma interna.

## 10.5 Análise dos Resultados

Como se pode verificar no gráfico seguinte, não existiram alterações significativas ao longo dos testes efectuados no que diz respeito à deformação do painel frontal da caldeira. As diferenças andam na ordem das décimas de milímetro o que leva a concluir que se devem à pouca exactidão do método de medição.

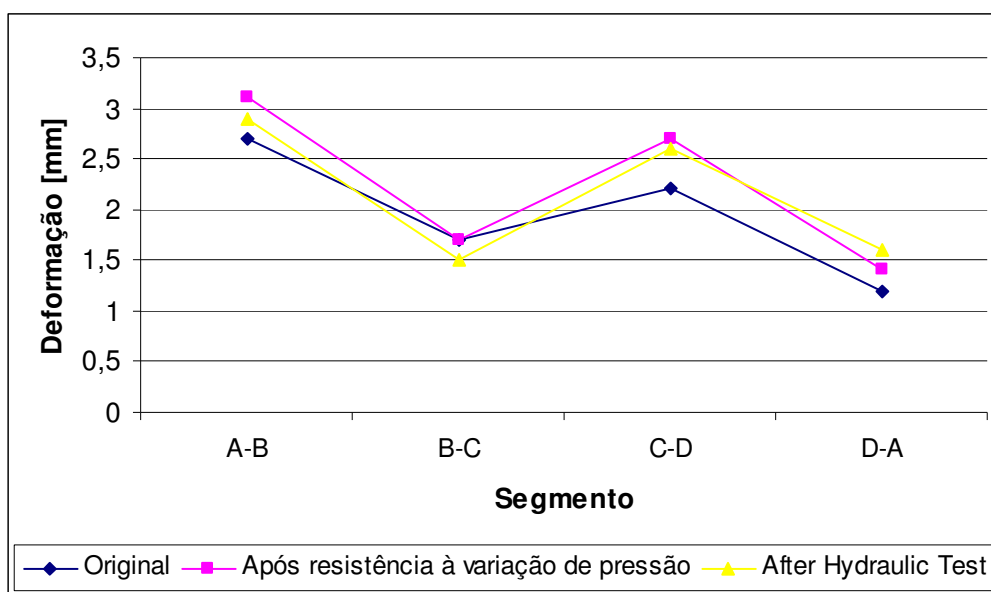


Gráfico 10.6 - Evolução da deformação ao longo dos diferentes testes

A evolução da estanquicidade ao longo dos testes pode ser observada no gráfico seguinte.

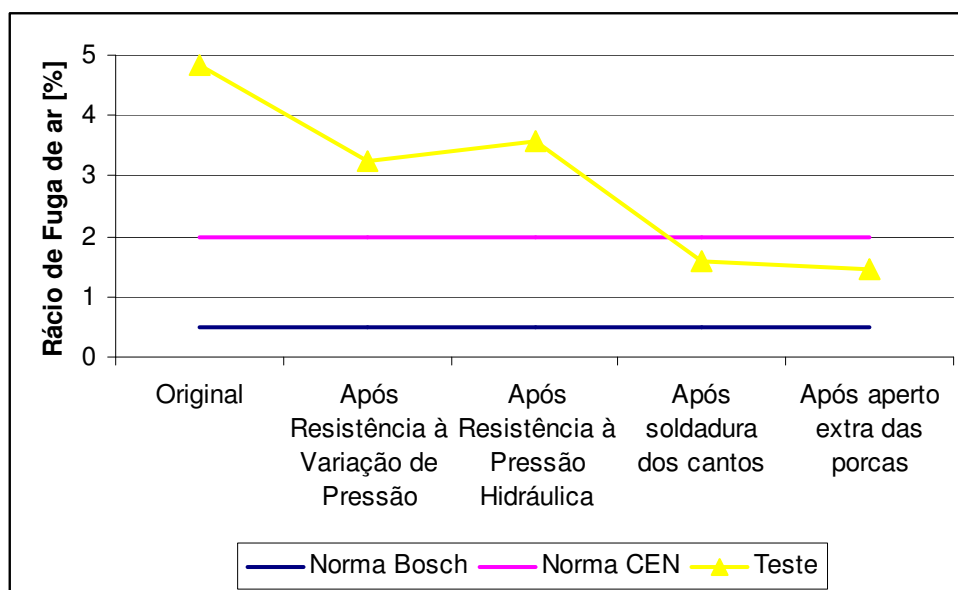


Gráfico 10.7 - Evolução do volume de fuga de ar ao longo dos testes

Como se pode verificar, o primeiro teste teve uma estanquicidade muito menor do que após o teste de “Resistência à Variação de Pressão Hidráulica”. Esta diferença não se deve ao facto deste último teste tornar a caldeira mais estanque mas ao facto de o colector de gases de exaustão não se encontrar bem fixado aquando do primeiro teste. Infelizmente, visto que foi o primeiro teste de estanquicidade a ser realizado na empresa, não foi possível fazer uma análise qualitativa dos resultados que indicaria a necessidade de repetir o teste.

A estanquicidade da caldeira aumentou ligeiramente após o teste de “Resistência à Pressão Hidráulica” porém crê-se que este resultado derive mais da fraca exactidão do procedimento e da banca de teste do que do eventual efeito de aperto que este último teste terá provocado.

Após a soldadura dos cantos do colector de gases de combustão, verifica-se uma diminuição acentuada do volume de fugas. Após o aperto extra, verifica-se uma redução em 8% do volume de fugas. Estes resultados confirmaram que a principal fonte de fugas é o colector de gases de exaustão e a necessidade de especificar a força de aperto das porcas que o fixam.

No teste da caldeira de 730 kW, nenhuma das opções de concepção apresenta um rácio de fugas inferior à norma interna de 0,5%. Porém a concepção em cruz já possibilita um rácio de 1,19%. Verifica-se que a corda com um maior raio no canto do colector não melhora a estanquicidade e que a redução do rácio de fugas na concepção de raio menor se deve ao facto do colector ter sido soldado nos cantos aquando da operação de aumento do raio.

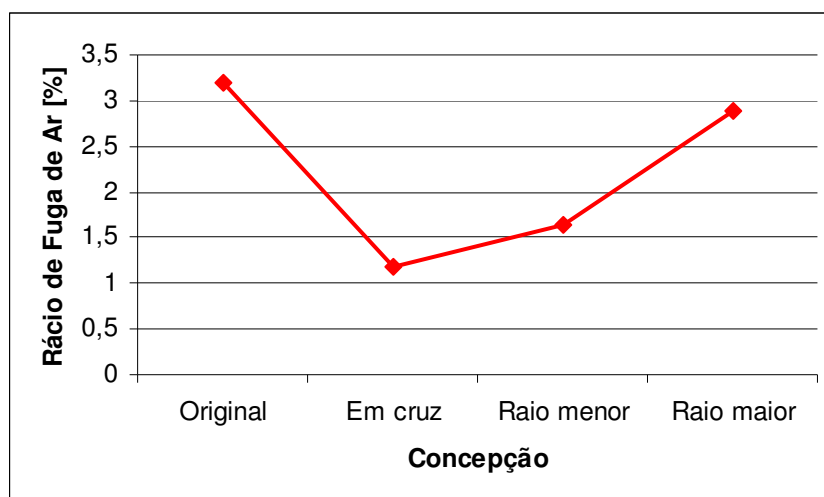


Gráfico 10.8 - Relação entre a concepção do vedante e o rácio de fugas

O último teste com a utilização de silicone vedante e cantos soldados fornece o melhor resultado de fugas – 0,65% – e uma maior gama de soluções.



## 10.6 Conclusões

Quanto à deformação plástica existente no painel frontal da caldeira, conclui-se que não se deve ao teste de pressão a 8bar (rel.) feito na produção. Esta conclusão é assente no facto do painel não ter sofrido qualquer deformação durante o teste de pressão a 12bar. A deformação existente deve-se à má tolerância do método de produção utilizado na soldadura do painel frontal, o que vai de encontro a opinião inicial da equipa de desenvolvimento.

Quanto à estanquicidade das caldeiras, conclui-se que as caldeiras produzidas neste momento não respeitam o volume mínimo de fugas que a caldeira pode ter e desenvolveram-se as seguintes opções de resolução do problema:

- soldar os cantos do colector de gases de escape com a desvantagem do uso de mão-de-obra qualificada e matéria-prima cara;
- usar a disposição do vedante em cruz com a desvantagem de usar quatro vedantes ao invés de um com consequências negativas na logística e nos tempos de produção da fábrica;
- usar o silicone vedante com a desvantagem de se tratar de uma matéria-prima muito cara e da sua aplicação consumir muito tempo.

Numa fase inicial, as decisões tomadas foram:

- na produção, soldar os cantos do colector de gases de combustão;
- nas caldeiras já comercializadas, se for possível soldar os cantos, utilizar a disposição em cruz e vedar o colector com silicone vedante.
- testar todas as caldeiras que saiam da produção.

Por definir, ficou a definição do binário de aperto das porcas que fixam o colector de gases de combustão.

## 11 Conclusões e Trabalhos Futuros

Os quatro meses durante os quais o presente projecto se desenvolveu na Bosch Thermotechnika s.r.o. permitiram elevar a qualidade do produto final. Os critérios e testes desenvolvidos deverão agora ser implementados para continuar o processo de melhoria. Porém continuam a existir pontos em que o desenvolvimento de produto pode ser melhorado, não só do ponto de vista da robustez e da durabilidade como do ponto de vista da eficiência.

A implementação do projecto foi bem sucedida, todos os pontos propostos foram aceites pela escala hierárquica que se estende ao quartel-general da Bosch Thermotechnik na Alemanha. O trabalho foi classificado como “Excelent” pelo Vice-presidente para a Engenharia e Produção da Bosch Thermotechnika s.r.o. no documento “Erasmus - Placements - Qualitive Evaluation Report”. Os critérios de robustez serão usados no desenvolvimento da próxima geração de caldeiras e as soluções encontradas para o problema de estanquicidade da gama Prexal foram implementadas na fábrica. Infelizmente, alguns pontos não puderam chegar à sua etapa final, a banca de testes e os testes de durabilidade.

Os pontos não implementados terão de ser enquadrados numa empresa em reestruturação desde que a Bosch Thermotechnik adquiriu a Dakon s.r.o. em 2005. Inicialmente, a atenção foi focada na produção, devido às possibilidades gritantes na melhoria da eficiência do processo logístico interno e externo, segurança e manutenção que permitiu atingir aumentos anuais da produtividade de 20% nos últimos 3 anos. Actualmente, apesar do processo de melhoria da produtividade ser um processo contínuo, as atenções viraram-se para o desenvolvimento de produto. Visto que os produtos desenvolvidos anteriormente não tinham sido sujeitos a FMEA, a testes de durabilidade, de campo e de robustez, neste momento existe um volume de trabalho que não permite focar a atenção dos colaboradores num só projecto.

Além do mais, o desenvolvimento de um projecto real envolve sempre um risco associado aos calendários das diferentes entidades envolvidas no projecto. A compra de um componente é um processo que envolve a equipa de desenvolvimento – que define as características do componente, as compras – que contacta os diferentes fornecedores, os fornecedores – que estabelecem o prazo de entrega do produto e os instaladores – que estabelecem o prazo de instalação. No caso da banca de ensaios, existiram dois elementos desta cadeia que falharam, o revendedor das bombas Willo que não conseguiu fornecer a bomba seleccionada dentro dos prazos desejáveis e a empresa instaladora, devido ao facto deste trabalho ter decorrido na época alta de aquecimento, onde as solicitações para a

resolução de problemas de instalação são maiores. No caso dos testes de durabilidade, as razões são ligeiramente diferentes. Os testes de durabilidade são um projecto mais abrangente que envolve uma estrutura física mais pesada. Visto que os testes se estendem por um período alargado de tempo, decidiu-se a construção de uma zona dedicada somente aos testes de durabilidade onde o calor produzido pelas caldeiras seria utilizado para aquecer os edifícios de administração e engenharia. Os processos de licenciamento e de construção associados a esta decisão, evidentemente que hipotecaram a possibilidade de realização dos testes. Teria sido possível testar os procedimentos com o técnico do laboratório caso, como foi referido no parágrafo anterior, não existisse um volume de trabalho que abafasse esta possibilidade. Este teste dos procedimentos de durabilidade iria permitir sentir a opinião do operador sobre os procedimentos adoptados, a sua capacidade de avaliação dos critérios e a operatividade do procedimento resultando uma análise que permitiria melhorar o procedimento, infelizmente tal não aconteceu. Apesar destas contrariedades, foram elaborados e devidamente arquivados documentos descritivos dos procedimentos e das instruções de utilização das bancas de teste. Deste modo, permite-se, num futuro próximo, que a instalação das bancas e a implementação dos testes ocorra sem dificuldades de maior.

A evolução do projecto teve outros tipos de contrariedades. A barreira linguística foi uma das contrariedades mais marcantes impedindo o contacto directo com os fornecedores, instaladores e colaboradores. Caso esta barreira não se tivesse erguido, o processo de aquisição de conhecimento seria mais célere – existiu a necessidade leitura de normas e manuais de instrução em checo e alemão, a logística associada ao transporte das caldeiras (até 1,4 ton) seria facilitada, a produção dos adaptadores para os testes de estanquicidade e resistência hidráulica seria facilitada e o processo de compra e instalação dos produtos seria mais rápido. Porém o mundo actual vive numa economia global, sem fronteiras, pelo que se pode observar esta experiência como positiva do ponto de vista pessoal.

Da análise mais detalhada dos pontos abordados no presente projecto, tiram-se as seguintes conclusões. Apesar da banca de testes não ter sido instalada, a sua concepção foi bem sucedida; optimização dos componentes, modularidade e operatividade da instalação e concepção compacta são os seus pontos fortes sem colocar em questão a sua eficácia. A modularidade permitirá que na existência de algum problema na banca (originado pela má definição dos requisitos definidos pelo requerente), estes poderão ser facilmente resolvidos. A sua concepção compacta permitirá que a banca seja instalada numa estrutura metálica móvel tornando-se muito útil para a performance de testes na zona de durabilidade ou em testes de

campo. A optimização dos componentes e a selecção de componentes comerciais, apesar de dificultar a operação, permitiu reduzir os custos o que contribuiu para uma fácil aceitação da proposta por parte das hierarquias. Os testes de durabilidade são bastante simples de operar e permitem a redução do período de teste. Para tal, muito contribuíram os métodos de inspecção utilizados pela sua simplicidade, mas sem colocar em causa a sua fiabilidade, podendo ser realizados por mão-de-obra não qualificada e dos quais resultam dados simples de interpretar. Os dados quantitativos que derivam da sua análise permitem fazer uma projecção da evolução dos processos de degradação dos componentes reduzindo o tempo de performance do teste de 18 meses para apenas 6 meses. Este facto é bastante importante porque irá reduzir o período de colocação do produto no mercado num tipo de produtos que normalmente são críticos quanto aos critérios de durabilidade porque a sua operação média é de 10000h. Os critérios de robustez serão bastante importantes para a melhoria da qualidade do produto. Este tipo de testes são algo ambíguos porque abrangem um conjunto alargado de avaliações, de eficiência, de segurança até de durabilidade. O documento elaborado permitiu a compilação de uma série de procedimentos que se encontravam dispersos ou não documentados. A organização destes critérios é muito importante do ponto de vista da gestão de informação e conhecimento da empresa. Assim, aquando do desenvolvimento de uma nova geração de caldeiras, o projectista já terá ao seu dispor um documento onde poderá consultar e seleccionar os testes que deseja que sejam efectuados. Deste modo, obter-se-ão produtos mais robustos, mais seguros que manterão a opinião positiva que o consumidor final tem sobre o produto. Os testes de estanquicidade, resistência à pressão hidráulica e resistência à mudança de pressão hidráulica permitiram uma abordagem prática do projecto. Poder-se-á dizer que o tipo de caldeiras testadas – alimentadas a combustíveis líquidos e/ou gás - não são do tipo a que este projecto se propôs testar – alimentadas a combustíveis sólidos – porém este tipo de testes podem e são efectuados em caldeiras a combustíveis sólidos. As bancas de teste, os procedimentos realizados, a análise de resultados e as soluções encontradas são as mesmas ou pelo mesmo pode ser feito um paralelismo para as caldeiras a combustíveis sólidos. Excluir a realização deste tipo de caldeiras do presente projecto, seria certamente empobrecê-lo e diminuir o seu valor. Este ponto foi um ponto muito bem sucedido porque permitiu a abordagem desde o problema inicial à solução final implementada em fábrica. Trata-se de um ponto extremamente completo porque exigiu a definição das bancas e procedimentos de teste, uma análise célere e crítica dos resultados e a apresentação de resultados técnica e economicamente viáveis. Foi com grande satisfação que o autor viu os resultados serem implementados na produção final.

Da análise do processo de desenvolvimento de produto na fábrica, conclui-se que existem três pontos a serem melhorados: a melhoria das instalações físicas do laboratório com aumento do número de bancas de teste de eficiência porque o número existente não é suficiente para os vários tipos de testes a realizar; a indexação de um colaborador com qualificação superior na área da energia ao desenvolvimento das caldeiras para a performance e análise dos testes mais comuns mas também para o desenvolvimento de novos injectores, novas chaminés e novos tipos de permutadores; e, um melhor arquivo que permita a condensação da informação gerada dentro do desenvolvimento. Este último ponto será o mais importante porque o maior valor que as empresas têm é o conhecimento. Actualmente, o conhecimento encontra-se concentrado em dois elementos devido a décadas de experiência. Quando um destes elementos sai dos quadros da empresa, todo este *know-how* desaparece. Pretende-se assim evitar o sucedido em 2002 quando um colaborador se reformou, colaborador esse considerado um *Guru* do desenvolvimento, e que colocou o departamento de desenvolvimento em dificuldades. Desde então, nenhuma caldeira a combustíveis sólidos foi desenvolvida de raiz tendo o desenvolvimento efectuado apenas pequenas alterações de melhoria.

O desenvolvimento de produto, área na qual o teste de caldeiras está indexada, não se resume à inovação, à investigação nem tão pouco se encontra fechado nos laboratórios de uma empresa. Para um desenvolvimento bem sucedido são necessários os *inputs* do mercado, das compras, da logística, da produção e acima de tudo é necessário conhecimento. E é a isso que o presente projecto se resume – o conhecimento. No final deste projecto, crê-se que se reuniu conhecimento tornando-o acessível a todos, do operador ao executivo, gerou-se conhecimento sobre o comportamento das caldeiras e criaram-se as condições necessárias à criação de conhecimento. Certamente que todo este conhecimento será fundamental para a viabilidade da fábrica ao criar produtos mais baratos, mais eficientes e mais robustos.

## 12 Referências e Bibliografia

Alfa Laval, 2004, *Pájené deskové výměníky tepla, Katalog výrobků pro HVAC (Ohřev, chlazení a klimatizaci).*

AS/NZS, 1999, AS/NZS 3869:1999 - *Domestic solid fuel burning appliances - Design and Construction.*

AS/NZS, 1999, AS/NZS 4012:1999 - *Domestic solid fuel burning appliances - Method of determination of power output and efficiency.*

AS/NZS, 1999, AS/NZS 4014:1999 - *Domestic solid fuel burning appliances - Test Fuels - Part 1: Hard Wood.*

AS/NZS, 1999, AS/NZS 4014:1999 - *Domestic solid fuel burning appliances - Test Fuels - Part 2: Softwood.*

AS/NZS, 2001, AS/NZS 2918:2001 - *Domestic solid fuel burning appliances – Installation.*

ASHRAE, 2001, *ASHRAE HVAC 2001 Fundamentals Handbook.*

Bosch Termotechnika s.r.o., 2007, *Istruzioni di montaggio, uso e manutenzione - caldaia a combustibile solido / Logano G121 e Logano S121WT.*

Bosch Termotechnika s.r.o., 2007, *Návod k montáži a údržbě - Ocelový kotel - Logano SK645/SK745.*

Bosch Termotechnika s.r.o., 2007, *Notice de montage, d'utilisation et d'entretien - Chaudières a combustible solide - Logano S111 (D) et Logano S111 (D) – WT.*

Browne, F.L., 1958, *Theories of the combustion of wood and its control – A survey of the literature*; U.S. Department of Agriculture..

ČSN, 1994, ČSN EN 304 - *Kotle pro ústředni vytápění. Předpisy pro zkoušení kotlu pro ústředni vytápění s rozprašovacími hořáky na kapalná paliva.*

DIN, 1999, DIN EN 303-5 : 1999-06, *Heating boilers - Part 5: Heating Boilers for Solid Fuels, hand and automatically stocked, with nominal heat output of up to 300 kW - Terminology, requirements, testing and marking.*

Engineering Extension , June 2003, *Solid Fuel Heating Appliances.*

IEA, 2006, *2006 Standard Review of Portugal.*

- INE, 2002, *Censos 2001, Resultados Definitivos, Portugal*.
- Kundu, P. K. e Cohen, I. M., 2002, *Fluid Mechanics*, Second Edition, Academic Press.
- Massachusetts Division of Energy Resources, 2007, *Wood Pellet Heating, A Reference on Wood Pellet Fuels & Technology for Small Commercial & Institutional Systems*.
- Munson, B. R. e Young, D. F., 2002, *Fundamentals of Fluid Mechanics, 4th Edition*, John Wiley & Sons, Inc..
- Nayyar, P.E, 1967, *PIPING HANDBOOK*, MCGRAW-HILL.
- Pinho, Carlos M. C. T., 2005, *Combustão*, DEMEGI.
- Roberge, Pierre R., 1999, *Handbook of Corrosion Engineering*, McGraw-Hill.
- Schwesing, 2007, *TT-VAN004 - FMEA - Failure Modes and Effects Analysis*; BBT Thermotechnik GMBH.
- Sørensen, Bent, 2004, *Renewable Energy - Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects*, Third Edition, Elsevier Science.
- Stefanko, *Underground Mining Methods handout*; University of Alaska Fairbanks.
- Talbot, D. and Talbot, J., 1998, *Corrosion science and Technology*, CRC Press.
- Wilo, 2007, *Catalogue Heating, Air-Conditioning, Cooling - Glandless Pumps - Catalog A1-50Hz*.
- World Energy Council, 2007, *2007 Survey of Energy Resources*.
- Zappe, R. W., 1999, *Valve Selection Handbook*; Gulf Professional Publishing.

### 12.1 Sítios na Internet Consultados

- ATMOS, 2009, <http://www.atmos.cz/>.
- Bosch Thermotechnika s.r.o, 2009, <http://www.dakon.cz/>.
- IEA Energy Statistics, 2009, <http://www.iea.org/statist/index.htm>.

## Anexo A - Procedimento de Teste “Estanquicidade do Colector de Gases de Escape”

1. Instale a caldeira;
2. Vede os adaptadores do colector de gases de exaustão e do queimador com fita metálica;



**Figura Anexo A.1 - Fita metálica no adaptador do colector de gases de exaustão**



**Figura Anexo A.2 - Fita metálica no adaptador do queimador**

3. Vede todas as conexões com fita teflon ou linho;
4. Instale os manómetros;
5. Conecte a banca de teste a caldeira;
6. Alimente a banca com ar;
7. Verifique a existência de fugas na instalação;
8. Atinja a pressão desejada através das duas válvulas existentes;
9. Corra o teste durante 5min com registo do caudal, temperatura do ar, pressão no caudalímetro, pressão na caldeira;
10. Use a folha de cálculo para determinar o caudal mássico equivalente de gases de escape - ver exemplo: Anexo B;
11. Elabore o relatório – ver exemplo: Anexo E;



## Anexo B - Exemplar de Folha de Cálculo de “Estanquicidade do Colector de Gases de Escape”

<b>name of boiler:</b>	<b>SK645-500</b>
<b>name of burner:</b>	
<b>add. notes:</b>	

<b>QBurner :</b>	<b>[kW]</b>	<b>546</b>	
<b>CO<sub>2</sub> :</b>	<b>[%]</b>	<b>9,8</b>	
<b>Fuel :</b>		<b>Ergas L</b>	
<b>Hot gas resistance:</b>	<b>[mbar]</b>	<b>2,7</b>	<b>X</b>
<b>Barometer reading :</b>	<b>[mbar]</b>	<b>998</b>	<b>1,2=</b>
<b>flue gas mass flow:</b>	<b>[kg/h]</b>	<b>850,0</b>	<b><u>3,24</u></b>
<b>δN bei 0 °C:</b>	<b>[kg/m³]</b>	<b><u>1,293</u></b>	

<b>Status start</b>	<b>Time</b>	<b>Status end</b>	<b>V-air</b>
<b>count</b>		<b>count</b>	<b>(Leaka</b>
<b>Gascoul.</b>		<b>Gasco</b>	<b>ge</b>
<b>[ m³ ]</b>	<b>[ min ]</b>	<b>ul.</b>	<b>raté)</b>
		<b>[ m³ ]</b>	<b>[ m³/h ]</b>

## Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos

86,400	5	86,7200	3,840
87,460	5	87,6900	2,760
87,810	5	87,9900	2,160
88,060	5	88,1600	1,200
0	1	0,0000	0,000

V-air	t-air	p-Boiler	m-air
[m³/h]	[°C]	[mbar]	[kg/h]
3,840	20,0	2,70	4,570
2,760	23,0	2,00	3,249
2,160	21,0	1,50	2,559
1,200	21,0	0,90	1,421
0	0,0	0,00	0,00

$\Delta P_{\text{calculation}}$       1,2  
 point=      \* $\Delta P$  =      3,24      mbar

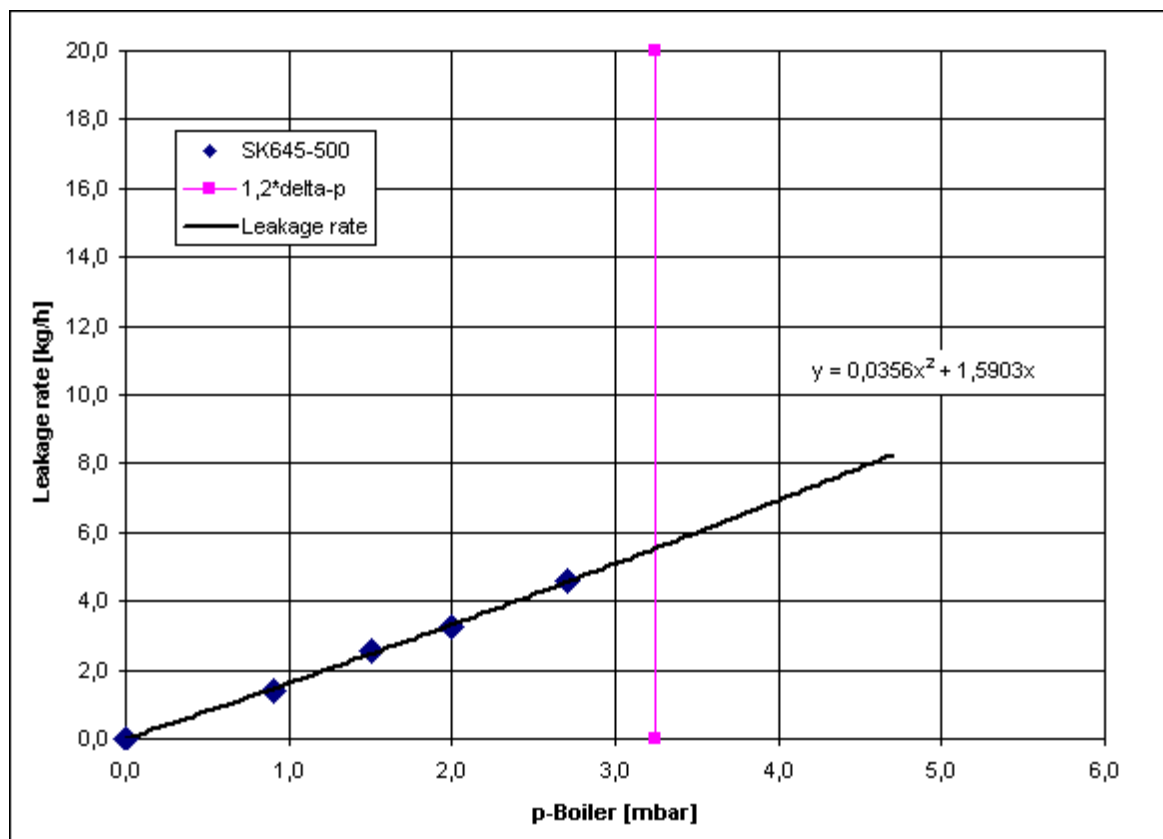
hot gas res.. leakage      kg/h      850,      kg/h      \*  
 rate [%] =      5,526      /      0      100 =      0,65%

---


$$m_{\text{air}} = V_{\text{air}} \cdot \delta N \cdot 273 / (273 + t_{\text{Gas}}) \cdot (p_{\text{Gas}} + \text{Bar.}) / 1013$$


---

$$= \begin{matrix} \text{Trend curve} & 5,5262 \\ & 8656 \\ & 0,0356 \cdot x^2 & + \\ & 1,5903 \cdot x \end{matrix}$$

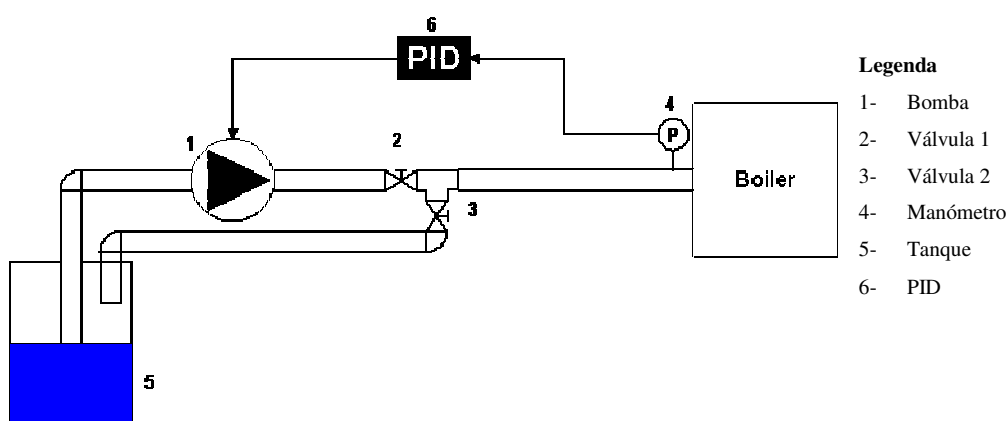


## Anexo C - Banca de Teste “Resistência à Variação da Pressão Hidráulica”

A banca de teste foi desenvolvida na Bosch Thermotechnik GmbH, filial alemã da Bosch Termotecnologia. Dispõe de um interface gráfico que permite o controlo do sistema, de um tanque onde a água é acumulada, uma bomba controlada por um PID cujo input é a pressão do sistema, um detector de nível de água no tanque que permite desligar a bomba em caso de fuga e de um permutador de calor que permite a dissipação de calor da água do sistema.



Figura Anexo D.1 - Banca de teste para “Resistência à Variação de Pressão Hidráulica”



Esquema Anexo C.1 - Versão simplificada da banca de teste para “Resistência à Variação de Pressão Hidráulica”

Os componentes da instalação tem as seguintes funções:

- Bomba - permite a elevação da pressão no sistema;
- Válvula 1 - permite criar uma resistência no sistema;
- Válvula 2 - permite criar uma resistência auxiliar no sistema;
- Manómetro - permite controlar a bomba através do PID;
- Tanque - permite a reutilização da água no teste;
- PID - permite o controlo da bomba;

Na interface gráfico, é possível controlar a pressão máxima e mínima, o período de tempo a pressão máxima e mínima, o n. de vezes que o detector de nível pode ser activado antes do sistema ser desligado e o n. de ciclos a que vamos submeter o sistema. Em atenção, dever-se-á ter o facto do período de pressão máxima ter de ser igual ou superior ao período de pressão mínima mais o período de alteração de pressão. Assim, se se verificar que após a introdução dos dados, este ultimo critério não for verificado, teremos de manipular os tempos de pressão máxima e mínima de modo a alcançarmos os períodos necessários. Se mesmo após a alteração dos dados não se conseguir atingir uma qualidade de ciclo satisfatória, ter-se-á de alterar os valores do PID.

No final, o ciclo de pressões devera ter o seguinte aspecto.

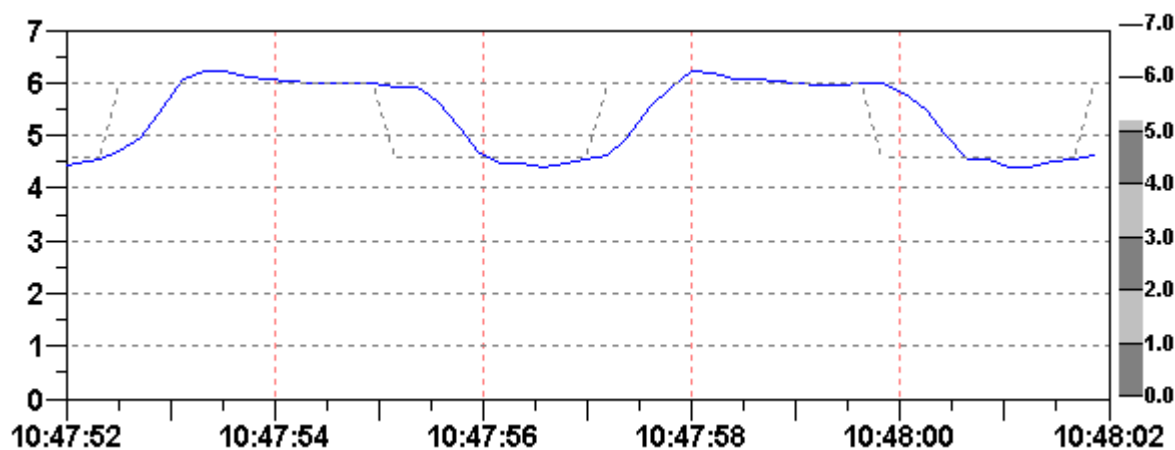


Gráfico Anexo C.1 - Perfil do ciclo de pressões desejado

## Anexo D - Procedimento de Teste “Resistência à Variação de Pressão Hidráulica”

1. Conecte a banca de ensaios a purga da caldeira e instale os adaptadores nas entradas e saídas de água;



**Figura Anexo D.1 - Ligação à purga da caldeira**



**Figura Anexo D.2 - Adaptadores das conexões de entrada e saída de água da caldeira**

2. Vede bem todas as ligações
3. Ligue a bomba;
4. Abra uma das válvulas da caldeira de modo a purgar o ar da caldeira;



**Figura Anexo D.3 - Visão superior da instalação da caldeira**

1. Após a purga do ar da caldeira, desligue a bomba;
2. Estabeleça para pressão máxima a pressão máxima de operação da caldeira;
3. Defina as pressões e n.º de ciclos do teste
  - a. Estabeleça para pressão mínima a pressão máxima subtraída por 1,4bar;
    - i. Estabeleça 37.500 ciclos;
  - Ou
  - b. Estabeleça para pressão mínima a pressão máxima subtraída por 0,7bar;
    - i. Estabeleça 300.000 ciclos;
4. Inicie o teste;
5. Ajuste os valores dos períodos de pressão máxima e pressão mínima de modo que o tempo em que a pressão se encontra no seu valor máximo, seja não inferior ao período em que a pressão não é máxima;
6. Execute o teste durante o número de ciclos definido;
7. Inspeccione a caldeira por fugas ou deformação plástica permanente;
8. Elabore o relatório.

## **Anexo E - Exemplo de Relatório de “Estanquicidade do Colector de Gases de Escape”**



Thermotechnology



Development Knuov  
TTCZ/EOS

Knuov, 09.12.2008

**TEST REPORT No.: 0004 / 08**

**Title:** Air Leakage Test - Logano SK645 250kW

**Purpose or extent of testing:** Measure the air leakage rate of Logano SK645 250kW

**Summary of the results:** The estimated air leakage rate was 18,90 kg/h for 1,8 mbar (1,2x Hot Gas Resistance) of air boiler pressure, corresponding to 4,84% of the total flue gas – 390kg/h. The air leakage rate is higher than the value set by the applicable standard – 2%.

Visual inspection allowed to find the biggest air leakage:

- the glass window for flame inspection;
- the flue gas collector edges.

Considering the air leakage, the boiler wasn't approved.

**Following actions:** Discuss the glass window fixing.  
New tests with welded flue collector edges and new disposal of the sealing rope

Development EOS:		Miranda	
4 Pages, 4 app.	editor:		
Project No.:	FSB:	final report:	intermediate information:
PCI:	Reference:	Related to Rep. No.:	1. .... 2. .... 3. ....
Specifications (if existing)		Deviations or Faults	
No.:	Date:	..... none	..... minor ..... significant
Special Remarks (Expl.:Dep., Area, Name):			

**Distribution:**

TTCZ/ENG3                      Mr. Kocian  
TT-FSB/ESB                      Mr. Bachmann

Test Report No.: 0004/08 – Air Leakage Test - Logano SK645 250kW

page 2

**Background:**

The pressure test in the production line created plastic deformation on the boilers rear panel. Doubts about the sealing of the flue gas collector appeared. To prevent future problems in the customer, it was decided to test the air leakage of the boiler.

**Test object:**

Boiler: Logano SK645 250kW SN: 7742160009-00-8330-001614

Note: The boiler tested didn't suffer any alteration from the standard production (i.e., no added sealing).

**Test results:**

The average temperature was 15°C and the ambient pressure was not measured. For calculations proposes the ambient pressure will be considered as the standard pressure in Albrechtice - 998 mbar.

It was made 4 tests with duration of 5min and pressure of 0,60, 1,2, 1,8 and 2,4 mbar. The results can be consulted on the following table.

Air Pressure [mbar]	Temperature [°C]	Flow meter Pressure [mbar]	Test Duration [min]	Initial Flow Meter Registry [m³]	Final Flow Meter Registry [m³]	Air leakage rate	
						[m³/h]	[kg/h]
2.40	16	4.7	5	92.80	94.27	17.640	21.327
1.80	15	3.4	5	98.23	97.51	15.120	18.320
1.20	15	1.8	5	99.15	100.14	11.880	14.371
0.60	15	1.5	5	100.32	100.98	7.920	9.578

Table 1 - Testing results

The results can be resumed in the following chart.

Test Report No.: 0004/08 – Air Leakage Test - Logano SK645 250kW

page 3

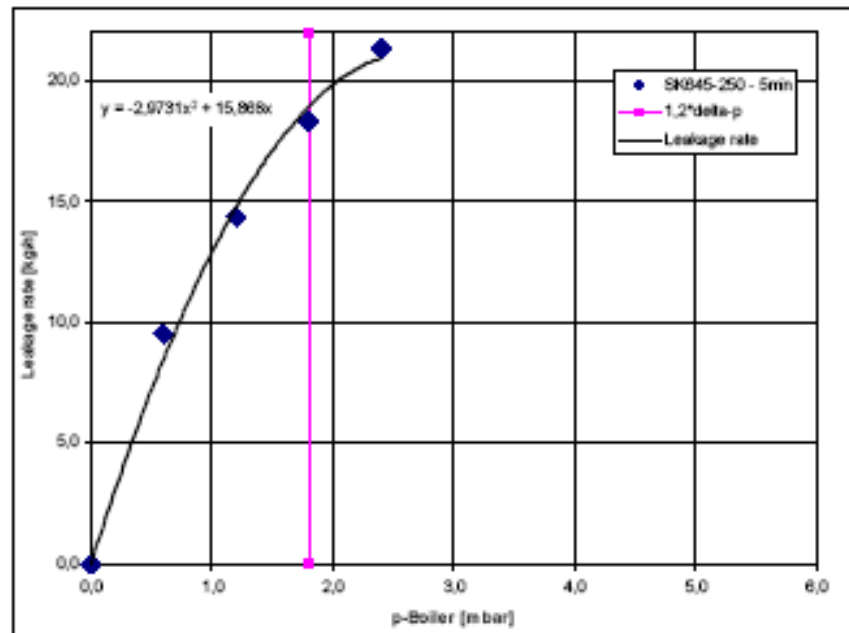


Chart 1 - Evolution of leakage rate with boiler pressure

Considering a flue mass flow of 390 kg/h, having an air leakage of 18,90kg/h, there will a leakage of 4,84% of the total flue mass flow. This value is above the 2% of air leakage recommended by the applicable standard.

Test Report No.: 0004/08 – Air Leakage Test - Logano SK645 250kW

page 4

Two additional pressure tests were made with the duration of 10 min and pressure of 1,8 and 2,4mbar.

Air Pressure [mbar]	Temperature [°C]	Flow meter Pressure [mbar]	Test Duration [min]	Initial Flow Meter Registry [m³]	Final Flow Meter Registry [m³]	Air leakage rate	
						[m³/h]	[kg/h]
2,40	16	4,7	10	92,80	95,75	17,640	21,327
1,80	13	3,4	10	96,25	98,80	15,120	18,320

The results can be resumed in the following chart.

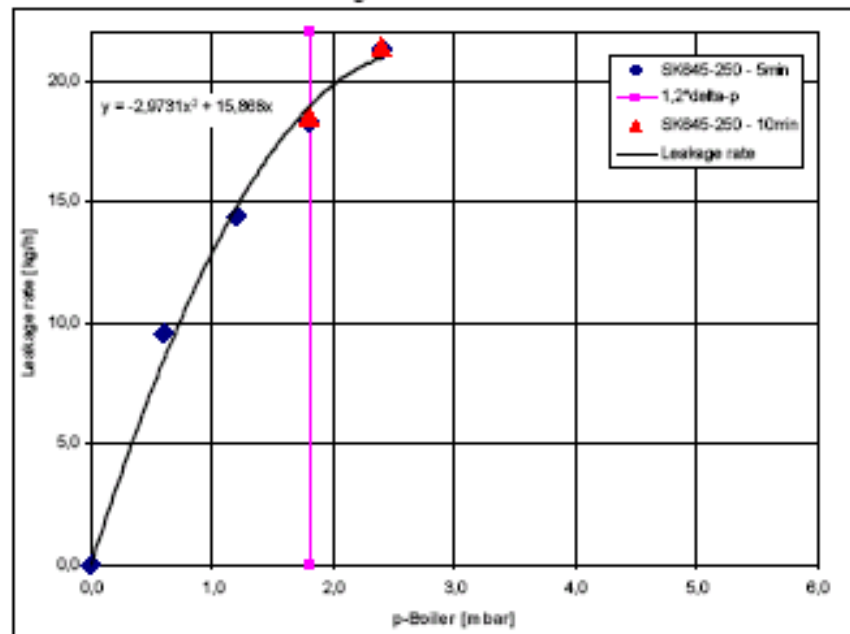


Chart 2 - Evolution of leakage rate with boiler pressure for 5 and 10 min duration test

As it can be seen, the duration of the test doesn't influence the accuracy of the air leakage rate, so the future tests should have a duration of 5min.

#### Other problems:

- the original glass window was broken – it was needed to replace it by a new one;
- no access for temperature measurement;
- no barometer;

#### Appendix

- Appendix 1: Boiler characteristics
- Appendix 2: Material
- Appendix 3: Testing Bank
- Appendix 4: Installation

Test Report No.: 0001/08 – Air Leakage Test - Logano SK645 500kW

---

Appendix 1: Boiler characteristics

- SN
- Type Logano SK645 250kW
- OutPut Pn 200-250 kW
- Input Qn 216-274 kW
- Tmax/TS 120°C
- PMS/PS 6bar
- Hot gas resistance 1.5 mbar;
- Flue gas mass flow 390 kg/h
- Volume 233 ltr
- Weight 642 kg

Test Report No.: 0001/08 – Air Leakage Test - Logano SK645 500kW

**Appendix 2: Material**

- Testing Bank;
- Pressure meter;
- Spray;
- Cloth;
- Detergent.

Test Report No.: 0001/08 – Air Leakage Test - Logano SK645 500kW

Appendix 3: Testing Bank

The testing bank was constituted by compressed air net work inlet with admission controlled by a ball valve, two ball valves, one dry air flow meter according to the scheme and two pressure measuring points.

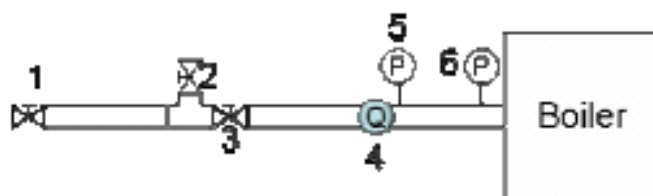


Figure 1 - Testing Bank

Description:

- 1 – Compressed air network – admission controlled by ball valve
- 2 – Ball valve 1
- 3 – Ball valve 2
- 4 – Flow meter
- 5 – Pressure measuring point
- 6 – Pressure measuring point

Test Report No.: 0001/08 – Air Leakage Test - Logano SK645 500kW

**Appendix 4: Installation**

1. Install the boiler;
2. Seal the burn flange and exhaust adaptor with adhesive metal tape ;



Figure 2 - Adhesive metal tape on the collector for the chimney adaptor



Figure 3 - Adhesive metal tape on the burn flange

3. Seal all the connections with Teflon or with flax;
4. Install the pressure meters;
5. Connect the testing bank to the boiler;
6. Achieve the desired pressure with the existing ball valves.



## **Anexo F - Exemplo de Relatório de “Resistência a Variação de Pressão Hidráulica”**

Thermotechnology



Development Kruov  
TTCZ/EOS

Kruov, 18.12.2008

**TEST REPORT No.: 0005/ 08**

**Title:** Pressure Change Resistance Test - Logano SK645 250kW

**Purpose or extent of testing:** Simulate pressure change suffered by the boiler during its life time.

**Summary of the results:** After 37500 cycles, with a drop of 1,4bar, higher pressure of 6bar and lower pressure of 4,6bar, the boiler didn't show any sign of damage, plastic deformation or water leakage.

The deformation of the rear panel increased in general but it's discussible if this difference is the result of the change pressure test or of the lack of accuracy of the measurement procedure.

Considering the pressure change resistance, the boiler was approved.

**Following actions:** Air leakage test after pressure change resistance test.  
Discuss the reliability of rear panel deformation measurement.

Development EOS:		Miranda	
3 Pages, 2 app.	editor:		
Project No.:	FSB:	final report:	intermediate information:
PCI:	Reference:	Related to Rep. No.: 1. .... 2. .... 3. ....	
Specifications (if existing)		Deviations or Faults	
No. ....	Date: .....	..... none	..... minor
		..... significant	
Special Remarks (Expl.:Dep., Area, Name):			

**Distribution:**

TTCZ/ENG3 Mr. Kocian  
TT-FSB/ESB Mr. Bachmann

Test Report No.: 0004/08

Pressure Change Resistance Test - Logano SK645 250kW

page 2

### Background:

To predict the behaviour of the boiler in long term service to pressure change, it was performed a pressure change resistance test.

### Test object:

Boiler: Logano SK645 250kW SN: 7742160009-00-8330-001614

Note: The boiler tested didn't suffer any alteration from the standard production (i.e., no added sealing).

### Test results:

The test was performed during 2 days, corresponding to 37500 cycles, with higher pressure of 6bar, lower pressure of 4,6 bar, corresponding to a 1,4bar drop.

The test was performed without any stop, with an average ambient air temperature of 21°C and an average operation water temperature of 28°C. The outside pressure was about 970 mbar.

The pressure profile can be seen in the following chart.

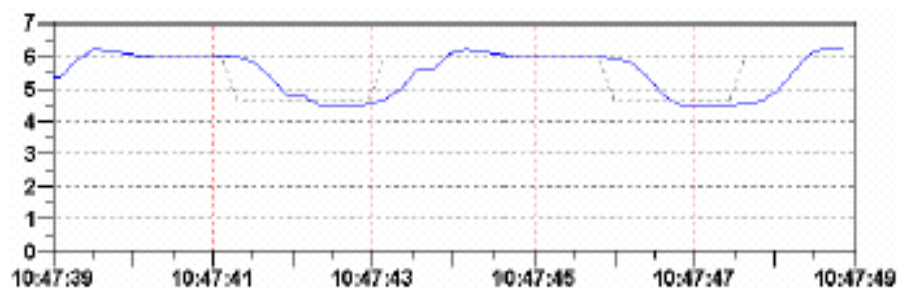


Chart 1 - Pressure change profile

To achieve this profile, the control system had the following input:

- Higher pressure – 6bar;
- Lower pressure – 4,6bar;
- High pressure period – 2s;
- Low pressure period – 1s;
- PID: KP=430;  
TN=0,08;  
TV=0,01.

After the 37500 cycles, the boiler didn't show any leakage or visible plastic deformation.

Test Report No.: 0004/08

Pressure Change Resistance Test - Logano SK645 250kW

page 3

In the following table, it can be seen the rear panel deformation before and after the pressure change test.

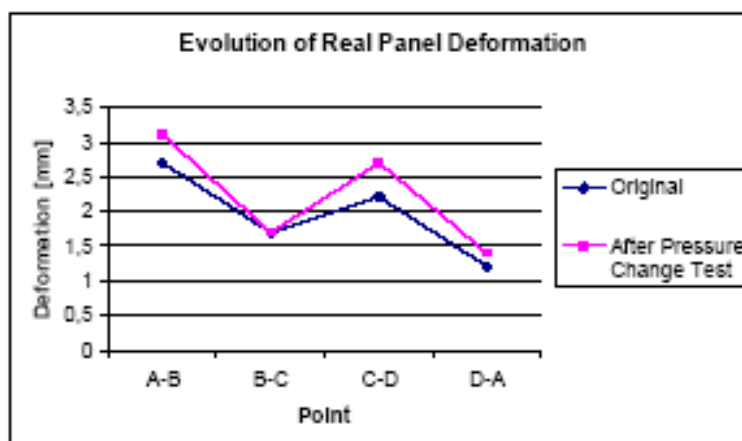


Chart 2 - Evolution of Rear Panel Deformation

As it can be verify, the deformation of the rear panel increased in general but it's discussible if this difference is the result of the change pressure test or of the lack of accuracy of the measurement procedure.

Considering the pressure change resistance, the boiler was approved.

### Appendix

Appendix 1: Boiler characteristics

Appendix 2: Material

### References

- Gröschl; Bedienungsanleitung – Druckwechselstation 5; 2007

Test Report No.: 0001/08 – Air Leakage Test - Logano SK645 500kW

---

**Appendix 1: Boiler characteristics**

- SN
- Type Logano SK645 250kW
- OutPut Pn 200-250 kW
- Input Qn 216-274 kW
- Tmax/TS 120°C
- PMS/PS 6bar
- Hot gas resistance 1,5 mbar;
- Flue gas mass flow 390 kg/h
- Volume 233 ltr
- Weight 642 kg

Test Report No.: 0001/08 – Air Leakage Test - Logano SK645 500kW

---

**Appendix 2: Material**

- Testing Bank;
- 3x boiler water inlet adaptor;
- 1x sewer adaptor;
- 1x thermometer.

## **Anexo G - Exemplo de Relatório “Resistência à Pressão Hidráulica”**

Thermotechnology



Development Kmnov  
TTCZ/EOS

Kmnov, 07.01.2009

**TEST REPORT No.: 0001/ 09**

**Title:** Hydraulic Pressure Resistance Test - Logano SK645 250kW

**Purpose or extent of testing:** Simulate overload pressure on the boiler.

**Summary of the results:** The boiler was submitted to 12bar hydraulic pressure corresponding to 2x the maximum operation pressure.

After the pressure resistance test, the boiler didn't present any kind of visible deformation or water leakage.

The deformation of the rear panel didn't increase during the test.

From the point of view of the hydraulic pressure resistance, the boiler was approved.

**Following actions:** Perform the air leakage test.

Development EOS:		Miranda	
3 Pages, 2 app.	editor:		
Project No.:	FSB:	final report:	intermediate information:
PCI:	Reference:	Related to Rep. No.:	1. .... 2. .... 3. ....
Specifications (if existing)		Deviations or Faults	
No.:	Date:	..... none	..... minor
		..... significant	
Special Remarks (Expl.:Dep., Area, Name):			

**Distribution:**

TTCZ/ENG3      Mr. Kocian  
TT-FSB/ESB      Mr. Bachmann



Test Report No.: 0001/09

**Hydraulic Pressure Resistance Test - Logano SK645 250kW**

page 2

**Background:**

To predict the behaviour of the boiler when subjected to overload pressure of 12 bar.  
This boiler has already been subjected to pressure change test.

**Test object:**

Boiler: Logano SK645 250kW      SN: 7742160009-00-8330-001614

Note: The boiler tested didn't suffer any alteration from the standard production (i.e., no added sealing).

**Test results:**

The test was performed during 10 min with a pressure of 12bar.

The test was performed with an average ambient air temperature of 17°C and an average operation water temperature of 12,5°C. The outside pressure was about 973 mbar.

After the 10min, the boiler didn't show any leakage or visible plastic deformation.



Figure 1 - Overview of the boiler

Test Report No.: 0001/09

Hydraulic Pressure Resistance Test - Logano SK645 250kW

page 3

In the following table, it can be seen the rear panel deformation before and after the hydraulic pressure resistance test.

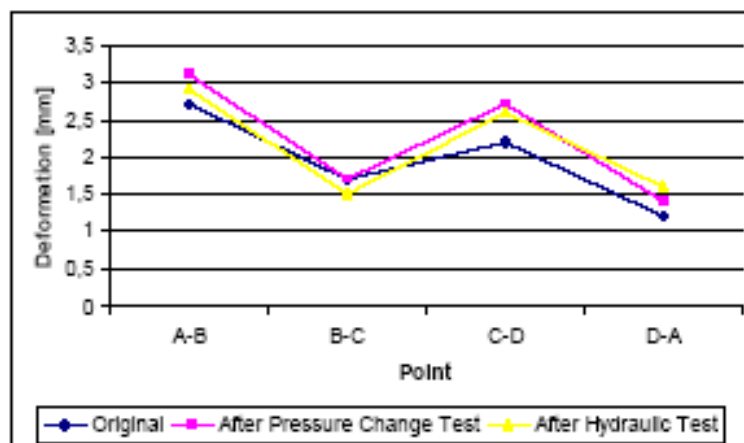


Chart 1 - Evolution of Rear Panel Deformation

As it can be verify, the deformation of the rear panel didn't increased.

From the point of view of the hydraulic pressure resistance, the boiler was approved.

### Appendix

Appendix 1: Boiler characteristics

Appendix 2: Material

Appendix 3: Installation

Test Report No.: 0001/09

Hydraulic Pressure Resistance Test - Logano SK645 250kW

page 4

**Appendix 1: Boiler characteristics**

- SN
- Type Logano SK645 250kW
- OutPut Pn 200-250 kW
- Input Qn 216-274 kW
- Tmax/TS 120°C
- PMS/PS 6bar
- Hot gas resistance 1,5 mbar;
- Flue gas mass flow 390 kg/h
- Volume 233 ltr
- Weight 642 kg

Test Report No.: 0001/09

Hydraulic Pressure Resistance Test - Logano SK645 250kW

page 5

**Appendix 2: Material**

- 3x boiler water inlet adaptor;
- 1x Pressure meter;
- 1x pump;
- 1x thermometer.

Test Report No.: 0001/09

Hydraulic Pressure Resistance Test - Logano SK645 250kW

page 6

Appendix 3: Installation

1. Install the boiler;
2. Install the flange adaptor, pressure meter and the pump;

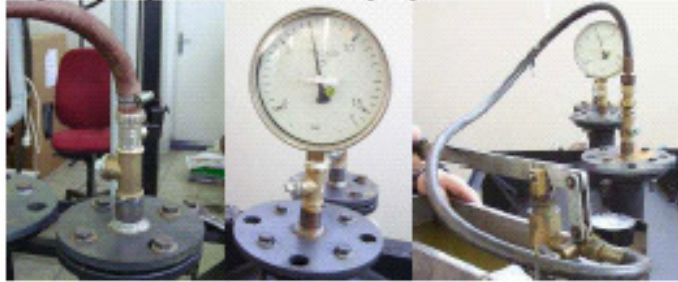


Figure 2 - Flange adaptor, pressure meter and pump installation

3. Install and seal the connections to the water network;



Figure 3 - Water network connections

4. Open the water network valve;
5. Open the flange adaptor and pump valves;
6. Water fulfill the boiler;
7. Close the water network valve;
8. Close the flange adaptor and pump valves;
9. Open the water network valve;
10. Wait for the pressure to achieve the network pressure;
11. Close the water network valve;
12. Increase the pressure using the pump til you get 12bar;



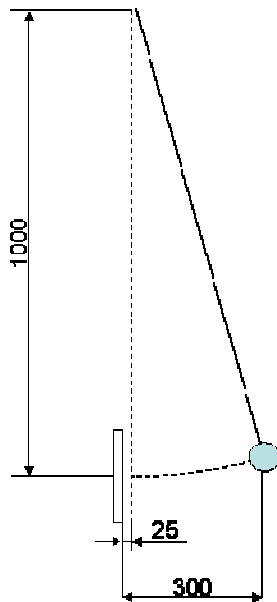
Figure 4 - Pressure meter and chronometer

## Anexo H – Critérios de Robustez – Procedimentos de Teste

### Resistência ao impacto de painéis envidraçados

1. Montar o painel envidraçado como em operação real;
2. O painel deve ser fixado para evitar movimentos durante o teste;
3. Suspender uma esfera de 500g a partir de um ponto 1000mm acima do ponto de impacto e posiciona-la de modo a que toque somente no ponto de impacto;
4. Largar a esfera de uma distância de 300mm na horizontal;
5. Repetir o teste 3 vezes;
6. Inspeccionar o painel por brechas ou zonas partidas;
7. Elaborar o relatório;

Esquema:



### Resistência ao impacto da câmara de combustão

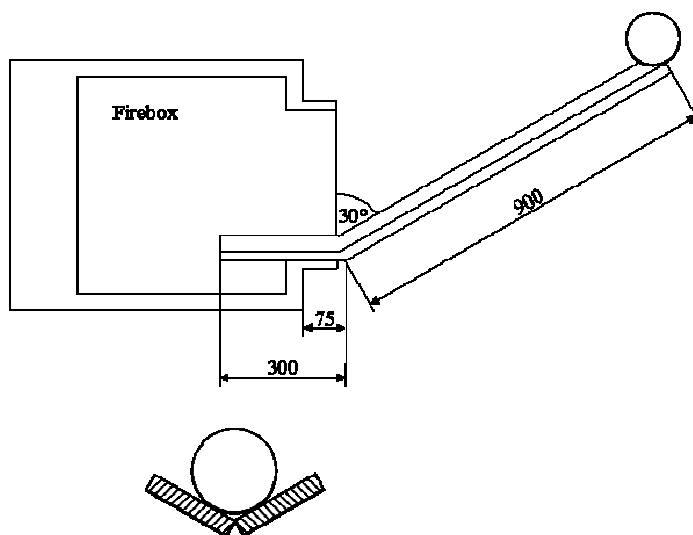
#### 1 Caldeira alimentada verticalmente

- 1.1 Deixe cair uma esfera com 1,6kg posicionada a 230mm acima da porta da câmara de combustível de modo a que caia aproximadamente no centro da câmara de combustível;
- 1.2 Repita o processo 3 vezes;
- 1.3 Inspeccione por componentes rachados ou partidos;
- 1.4 Elabore o relatório.

#### 2 Caldeira alimentada horizontalmente

- 2.1 Faça uma esfera com 1,6kg rolar ao longo de uma rampa com 900mm de comprimento e uma inclinação de 30°, seguida de uma rampa horizontal com 300mm de modo a que a esfera embata directamente na parede da câmara de combustível;
- 2.2 Repita o teste 3 vezes.
- 2.3 Inspeccione por componentes rachados ou partidos;
- 2.4 Elabore o relatório.

Esquema:



Nota: No caso da câmara de combustão ser fabricada em material cerâmico, a formação de uma brecha no cerâmico não deve ser considerada com factor de exclusão considerando que o tijolo não se moveu da sua posição inicial nem que a eficácia do refractário não foi colocada em causa.

### **Resistência ao choque térmico do injector**

1. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação;
2. Coloque um injector extra dentro da câmara de combustível;
3. Retire o injector ao fim de 90min;
4. Coloque o injector no chão;
5. Após 5min, inspeccione o injector por rachas ou fracturas;
6. Elabore o relatório.

### **Resistência ao choque térmico dos painéis envidraçados**

1. Monte o painel envidraçado como em operação real;
2. Ajuste a caldeira para a operação de temperatura máxima;
3. Após 90min, passe um pano molhado na superfície do painel;
4. Inspeccione o painel por brechas ou fracturas;
5. Após 5min, com uma bisnaga, projecte 3 fluxos de água sobre o vidro;
6. Inspeccione o painel por brechas ou fracturas;
7. Elabore o relatório.

### **Resistência externa ao choque térmico**

1. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação;
2. Após 90min, com o auxílio de uma mangueira, projecte água com um caudal de 5l/min;
3. Inspeccione a caldeira por fugas de água ou zonas plasticamente deformadas;
4. Elabore o relatório.

### **Resistência do permutador ao choque térmico**

1. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação
2. Após atingir a temperatura máxima, abrir a válvula de admissão de água de modo que o caudal seja o máximo caudal permitido na operação da caldeira multiplicado por um factor de 1,2;
3. Execute o teste durante 3min;
4. Inspeccione a caldeira por fugas de água e zonas deformadas plasticamente;
5. Elabore o relatório.



**Resistência ao choque térmico do flap da câmara de combustão**

1. Ajustar a caldeira para a temperatura máxima de operação;
2. Após 90min, retire o flap e coloque-o no chão;
3. Inspeccione o flap por brechas e fracturas;
4. Elabore o relatório.

**Integridade estrutural da caldeira**

1. Coloque duas almofadas com 300mm por 100mm no topo da caldeira;
2. Coloque uma carga estática de 115kg de modo que se distribua uniformemente nas duas almofadas;
3. Após 15min, remova a carga estática;
4. Inspeccione a estrutura por deformações que coloquem em causa o funcionamento da caldeira;
5. Elabore o relatório.

**Integridade estrutural da câmara de combustão**

1. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação
2. Após 90min, realimente a caldeira com a carga volúmica máxima
3. Após a combustão completa do combustível, inspeccione a câmara por brechas ou fracturas;
4. Elabore o relatório.

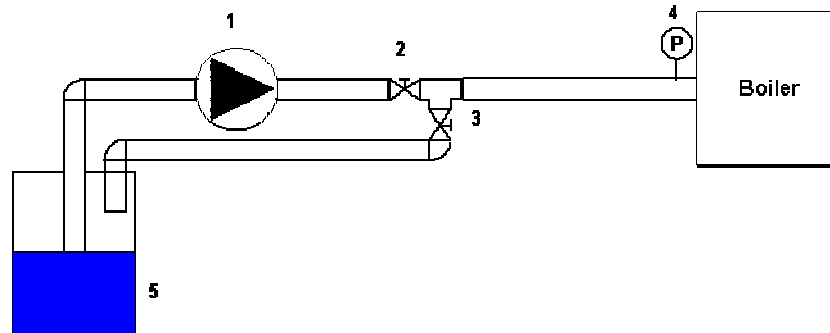
**Temperatura das superfícies externas**

1. Alimente a câmara de combustível da caldeira totalmente;
2. Ajuste a caldeira para a temperatura de operação máxima;
3. Após 90 min, meça as temperaturas das superfícies;
4. Verifique a conformidade das temperaturas;
5. Elabore o relatório.

### Resistência a pressão hidráulica

1. Pressurize a caldeira com uma pressão de duas vezes a pressão máxima de operação da caldeira;
2. Execute o teste durante 10min;
3. Inspeccione a caldeira por fugas ou deformações plásticas;
4. Elabore o relatório.

Esquema:



### Resistência a variação de temperatura

1. Conecte a caldeira a banca de ensaios;
2. Estabeleça para temperatura máxima a temperatura máxima do sistema;
3. Estabeleça para temperatura mínima a temperatura máxima do sistema subtraída por 20K;
4. Estabeleça 37.500 ciclos;
5. Inicie o teste;
6. Execute o teste durante 37.500 ciclos;
7. Inspeccione a caldeira por fugas;
8. Elabore o relatório.

### Resistência a erosão do injector

1. Instale o injector
2. Faça um caudal de água de 20l/min atravessar o injector;
3. Execute o teste durante 18 dias;
4. Inspeccione o injector por brechas e fracturas;
5. Elabore o relatório.

### **Exaustão excessiva de gases de escape**

1. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação.
2. Ajuste a ventilação para uma pressão de 50 Pa.
3. Avalie o funcionamento da caldeira - eficiência, emissões e controlo de temperatura.
4. Inspeccionar a integridade da caldeira.
5. Elabore o relatório.

### **Exaustão deficiente de gases de escape**

1. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação
2. Ajuste a ventilação para uma pressão de 5 Pa
3. Avalie o funcionamento da caldeira - eficiência, emissões e controlo de temperatura
4. Inspeccione a integridade da caldeira
5. Elabore o relatório

### **Funcionamento com elevado quantidade de cinzas**

1. Opere a caldeira por um período correspondente a 10 períodos de limpeza sem efectuar a limpeza das cinzas;
2. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação;
3. Avalie o funcionamento da caldeira - eficiência, emissões e controlo de temperatura;
4. Inspeccione a integridade da caldeira;
5. Elabore o relatório.

### **Funcionamento com baixa temperatura do ar de combustão**

1. Alimente a caldeira com ar a -10°C
2. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação
3. Avalie o funcionamento da caldeira - eficiência, emissões e controlo de temperatura
4. Inspeccione a integridade da caldeira
5. Elabore o relatório

**Funcionamento com humidade do ar de 100%**

1. Alimente a caldeira com ar a 100% de humidade
2. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação
3. Avalie o funcionamento da caldeira - eficiência, emissões e controlo de temperatura
4. Inspeccione a integridade da caldeira
5. Elabore o relatório

**Funcionamento com elevado nível de concentração de CO no ar**

1. Alimente a caldeira com ar com uma concentração de 55 mg/m<sup>3</sup>
2. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação
3. Avalie o funcionamento da caldeira - eficiência, emissões e controlo de temperatura
4. Inspeccione a integridade da caldeira
5. Elabore o relatório

**Funcionamento com elevado nível de concentração de CO<sub>2</sub> no ar**

1. Alimente a caldeira com ar com uma concentração de 9000 mg/m<sup>3</sup>
2. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação
3. Avalie o funcionamento da caldeira - eficiência, emissões e controlo de temperatura
4. Inspeccione a integridade da caldeira
5. Elabore o relatório.

**Funcionamento com elevado nível de partículas sólidas em suspensão**

1. Alimente a caldeira com ar com uma concentração de partículas sólidas em suspensão de 5 mg/m<sup>3</sup>
2. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação
3. Avalie o funcionamento da caldeira - eficiência, emissões e controlo de temperatura
4. Inspeccione a integridade da caldeira
5. Elabore o relatório

### **Funcionamento com condensação na caldeira**

1. Ajuste a caldeira para a temperatura de 50°C
2. Avalie o funcionamento da caldeira - eficiência, emissões e controlo de temperatura
3. Inspeccione a integridade da caldeira
4. Elabore o relatório

### **Funcionamento com condensação na exaustão**

1. Instale o dispositivo de dissipação de calor na chaminé
2. Ajuste a temperatura da caldeira para 50C
3. Corra o teste durante 48h
4. Verifique se existe alguma falha crítica no funcionamento da caldeira
5. Elabore o relatório

### **Funcionamento com caldeira sem água**

1. Instale o dispositivo de dissipação de calor na caldeira
2. Ajuste a temperatura da caldeira para a temperatura máxima
3. Observe se o dispositivo de dissipação de calor é activado
4. Observe a capacidade do dispositivo de dissipar calor
5. Elabore o relatório

### **Chamas e brasas**

1. Encha completamente a câmara de combustível com combustível
2. Ajuste a caldeira para a temperatura máxima de operação
3. Após 90min, abra a porta rapidamente
4. Verifique se ocorre a saída de chamas através da porta ou a queda de brasas
5. Repita os 2 passos anteriores 3 vezes
6. Elabore o relatório

## **Anexo I – Características de Válvulas**

No presente anexo, são apresentados os principais tipos de válvulas, as suas vantagens, as suas desvantagens, as suas aplicações e a sua estrutura:

### 1. Válvula de Corrediça

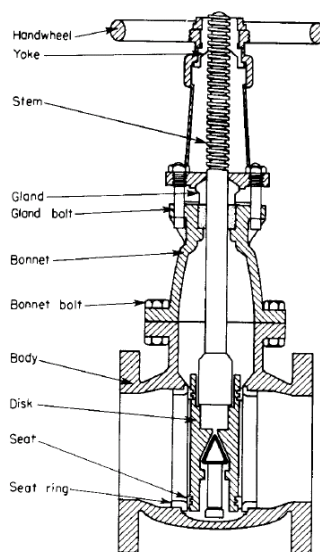
#### 1.1. Vantagens

- 1.1.1. Bidireccional;
- 1.1.2. Queda de pressão mínima;
- 1.1.3. Boas características de fecho;

#### 1.2. Desvantagens

- 1.2.1. Abertura e fecho lento;
- 1.2.2. Grande espaço necessário para a sua instalação, operação e manutenção;
- 1.2.3. Possibilidade de empenamento derivado das cargas térmicas ou da pressão;
- 1.2.4. A baixa velocidade da corrediça leva a criação de altas velocidades do fluído, podendo originar erosão;
- 1.2.5. Com flutuações térmicas consideráveis, tende a apresentar fraca estanquicidade;
- 1.2.6. Difícil reparação e maquinação;

#### 1.3. Esquema



**Esquema Anexo I.1 - Válvula corrediça (Zappe, 1999)**

## 2. Válvula de Globo

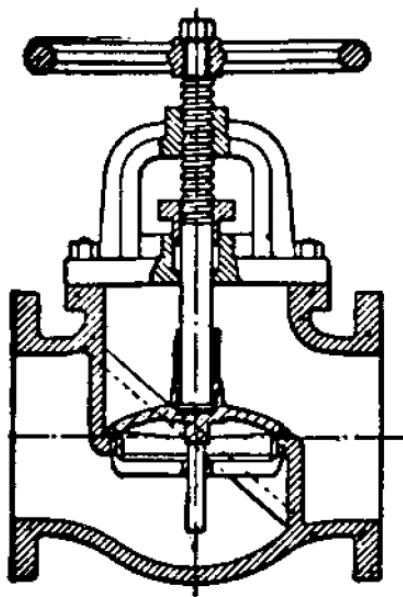
### 2.1. Vantagens

- 2.1.1. Boas características de fecho;
- 2.1.2. Capacidade moderada de controlo de caudal;
- 2.1.3. Abertura e fecho mais reduzido (comparada com a válvula de correção);
- 2.1.4. Disponíveis em T e padrões angulares;
- 2.1.5. Fácil de maquinar ou refacejar os assentos;

### 2.2. Desvantagens

- 2.2.1. Queda de pressão mais elevada (comparada com a válvula de correção);
- 2.2.2. Requer maior força ou um actuador mais potente;

### 2.3. Esquema



**Esquema Anexo I.2 - Válvula de globo (Zappe, 1999)**



### 3. Válvula anti-retorno

#### 3.1. Vantagens

3.1.1. Autónoma;

3.1.2. Actuação rápida;

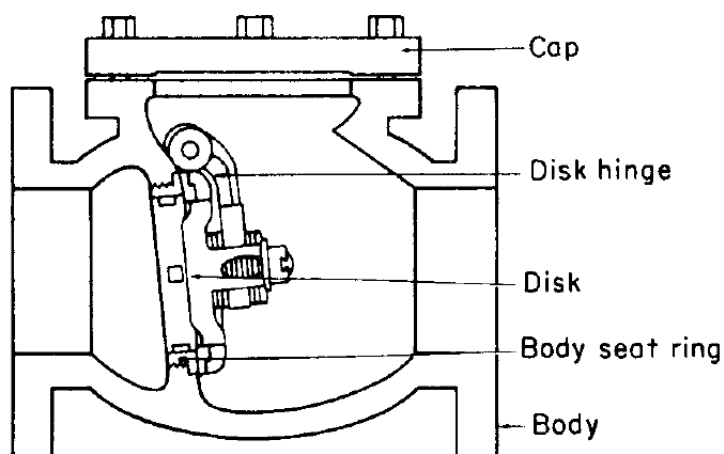
#### 3.2. Desvantagens

3.2.1. Visto que os componentes se encontram selados, é difícil verificar se a válvula se encontra aberta ou fechada e o estado das partes internas não pode ser verificado;

3.2.2. Limitações na configuração da instalação;

3.2.3. Disco da válvula pode ficar presa na posição aberta;

#### 3.3. Estrutura



**Esquema Anexo I.3 - Válvula anti-retorno (Zappe, 1999)**

### 4. Válvula de macho esférico

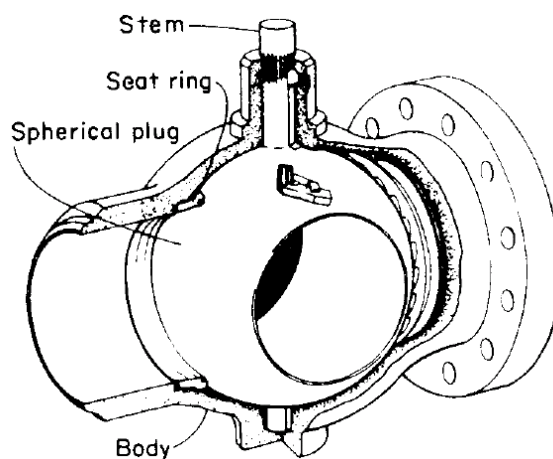
#### 4.1. Vantagens

- 4.1.1. Abertura e fecho rápido;
- 4.1.2. Tamanho mais pequeno que a válvula corrediça;
- 4.1.3. Mais leve que a válvula corrediça;
- 4.1.4. Várias entradas oferece versatilidade, reduzindo número de válvulas necessárias;
- 4.1.5. Vários tipos de concepção;
- 4.1.6. Pode ser usada em líquidos limpos ou com suspensões sólidas;
- 4.1.7. Proporcionam serviço confiável a altas pressões e temperaturas;
- 4.1.8. Força necessária para a sua actuação é inferior à válvula globo e à válvula de corrediça;

#### 4.2. Desvantagens

- 4.2.1. Não é desejável o seu uso para controlo de caudal permanente;
- 4.2.2. Em aplicações com contaminantes sólidos, estes ficam rapidamente aprisionados nas cavidades da válvula causando atrito, fugas e falha da válvula;

#### 4.3. Esquema



**Esquema Anexo I.4 - Válvula de macho esférico (Zappe, 1999)**

## 5. Válvula Borboleta

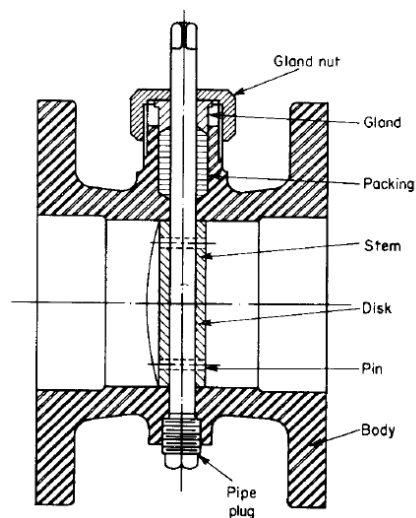
### 5.1. Vantagens

- 5.1.1. Conceção compacto;
- 5.1.2. Baixo peso;
- 5.1.3. Actuação rápida;
- 5.1.4. Disponível numa gama larga de tamanhos;

### 5.2. Desvantagens

- 5.2.1. Controlo de caudal só está disponível para pequenas perdas de caudal;
- 5.2.2. Controlo de caudal só disponível para ângulos de abertura entre 30 e 80 graus;
- 5.2.3. Problemas de cavitação e estrangulação são dois problemas potenciais;
- 5.2.4. O movimento do disco não é guiado e é afectado pela turbulência do escoamento;

### 5.3. Esquema



**Esquema Anexo I.5 - Válvula borboleta (Zappe, 1999)**

## **6. Válvula Diafragma**

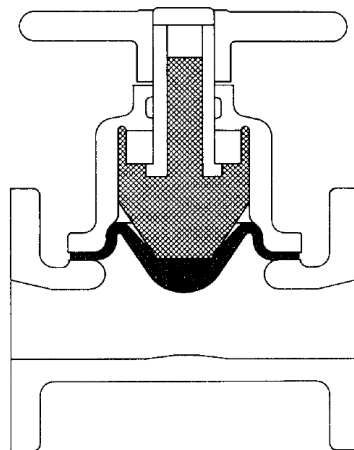
### **6.1. Vantagens**

- 6.1.1. Podem ser usadas como válvulas de On/OFF e como válvulas de controlo de caudal;
- 6.1.2. Boa resistência química;
- 6.1.3. Fugas através do fuso eliminada;
- 6.1.4. Impede a passagem de ar para a linha de água;
- 6.1.5. Não possui cavidades que possam aprisionar suspensões sólidas;

### **6.2. Desvantagens**

- 6.2.1. A sua forma pode impedir a drenagem completa do sistema;
- 6.2.2. Temperaturas e pressões de serviço dependentes do material do diafragma - normalmente pressões limitadas a 13 bar e temperaturas a 204°C
- 6.2.3. Diafragma também pode limitar a pressão estática;
- 6.2.4. Diafragma pode sofrer erosão quando usado extensivamente em condições severas de serviço de controlo de caudal com impurezas em suspensão;
- 6.2.5. Tamanhos limitados, entre ½ “ e 12 “;

### **6.3. Esquema**



**Esquema Anexo I.6 - Válvula diafragma (Zappe, 1999)**

## Procedimentos de Teste para Caldeiras a Combustíveis Sólidos

As tabelas seguintes apresentam os coeficientes de perda de carga e a variação de alguns tipos de válvulas, consoante o tipo de ligação, flangeada ou rosqueada, e o seu diâmetro.

Diâmetro Nominal [mm]	Tipo de Válvula							
	Globo		Corrediça		Angle		Anti-retorno	
	Rosqueada	Flanjeada	Rosqueada	Flanjeada	Rosqueada	Flanjeada	Rosqueada	Flanjeada
10	20	-	0,4	-	-	-	8,0	-
15	14	-	0,33	-	-	-	5,5	-
20	10	-	0,28	-	6,1	-	3,7	-
25	9	13	0,24	-	4,6	4,8	3,0	2
32	3,6	12	0,22	-	3,6	3,7	2,7	2
40	2,9	10	0,19	-	2,9	3,0	2,5	2
50	2,1	9	0,17	0,34	2,1	2,5	2,3	2
65	1,6	8	0,16	0,27	1,6	2,3	2,2	2
80	1,3	7	0,14	0,22	1,3	2,2	2,1	2
100	1,0	6,5	0,12	0,26	1,0	2,1	2,0	2
150	-	6	-	0,10	-	2,1	-	2
200	-	5,7	-	0,08	-	2,1	-	2
250	-	5,7	-	0,06	-	2,1	-	2
300	-	5,7	-	0,05	-	2,1	-	2

**Tabela Anexo I.1 - Perda de carga para diferentes tipos de válvulas, ligações e diâmetros (ASHRAE, 2001)**

Gama de Variação do Valor de K			
Tipo de Válvula	Globo	Rosqueada	±25%
		Flanjeada	±35%
	Corrediça	Rosqueada	±25%
		Flanjeada	±50%
	Angle	Rosqueada	±20%
		Flanjeada	±50%
	Anti-retorno	Rosqueada	±50%
		Flanjeada	-80% to 200%

**Tabela Anexo I.2 - Gama de variação da perda de carga para diferentes tipos de válvulas e ligações (ASHRAE, 2001)**

Na tabela seguinte, encontram-se resumidas as características das válvulas.

Tipo de Válvula	Características					
	Controlo de Caudal	Resistência Mecânica	Resistência Térmica	Vedação	Abertura/Fecho Célere	Queda de Pressão
Corrediça	Não	Má	Má	Excelente	Lento	Baixa
Globo	Regular	Boa	Boa	Boa	Regular	Regular
Macho Esférico	Excepcionalmente	Boa	Boa	Excelente	Rápida	Alta
Borboleta	Excepcionalmente	Excelente	Excelente	Regular	Rápida	Regular
Anti-retorno	Não	Boa	Boa	Boa	Rápida	n.a.
Diafragma	Excelente	Regular	Regular	Excelente	Rápida	Regular

**Tabela Anexo I.3 - Características dos diferentes tipos de válvulas (Zappe, 1999)**